

Вячеслав М. Барбашов, Николай С. Трушкин
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское шоссе, 31, Россия
e-mail: VMBarbashov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7136-415X>
e-mail: NSTrushman@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2407-084X>

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ ЦИФРОВЫХ
КМОП СБИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.1.03>

Аннотация. Рассмотрены методы обеспечения информационной безопасности, которые основаны на применении функционально-логического моделирования больших цифровых интегральных схем (СБИС) при воздействии ионизирующего излучения. Показано, что кратность узла и мощность спектра более точно описывается при использовании понятия нечеткой кратности. Предложены методы прогнозирования информационной безопасности БИС при воздействии ионизирующего излучения, которые основаны на модели нечеткого цифрового и вероятностного надежностного автоматов. Причем характер их изменения при облучении зависит от многих факторов, включая тип излучения, его интенсивность и спектр, вид критериального параметра характеризующего радиационную стойкость ИС, режим работы микросхем. Поэтому в разных диапазонах уровней или интенсивностей воздействия модель ИС может носить как нечеткий, так и вероятностный характер. Проведения такого сопоставления является необходимым этапом общей процедуры анализа радиационной стойкости ИС.

Ключевые слова: топологические вероятностные модели, нечеткие вероятности, зоны неопределенности.

Для цитирования. **БАРБАШОВ, Вячеслав М.; ТРУШКИН, Николай С.** ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ ЦИФРОВЫХ КМОП СБИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ. *Безопасность информационных технологий*, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 34-40, 2018. ISSN 2074-7136. Доступно на: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1091>>. Дата доступа: 14 feb. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.1.03>.

Vyacheslav M. Barbashov, Nikolai S. Trushkin
National Research Nuclear University MEPhI
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia
e-mail: VMBarbashov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7136-415X>
e-mail: NSTrushman@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2407-084X>

**Features of the model of main information failures in digital
CMOS VLSI at impact of the radiation**

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.1.03>

Abstract. The methods of information security, which are based on the use of functional-logical modeling of very large digital integrated circuits (VLSI) under the influence of ionizing radiation are considered. It is shown that the multiplicity of the node and the power of the spectrum are more accurately described when using the concept of fuzzy multiplicity. Methods are proposed for predicting LSI failures when exposed to ionizing radiation, which are based on the model of fuzzy digital and probabilistic reliability automata. Moreover, the nature of their changes during irradiation depends on many factors, including the type of radiation, its intensity and range, type a criteria parameter characterizing the radiation resistance of ICs and work mode. Therefore, in different ranges of levels or intensities of the impact of the IC model can be either of fuzzy or probabilistic nature. Carrying out such a comparison is an essential step in the overall analysis of the IC radiation resistance.

Keywords: topological probabilistic models, fuzzy probability, areas of uncertainty.

For citation. **BARBASHOV, Vyacheslav M.; TRUSHKIN, Nikolai S.** Features of the model of main information failures in digital CMOS VLSI at impact of the radiation. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 34-40, 2018. ISSN

Введение

Как, правило, в условиях воздействия радиации используется модель цифрового автомата с привлечением аппарата теории вероятности. В случае, когда необходим учет физических механизмов отказа СБИС, то построение функционально-логической модели такого класса предполагает использования нечеткого цифрового автомата Брауэра и переход от аксиоматики булевой решетки к аксиоматике векторной решетки для каждого $x \in X$ [1, 2]. Реальный характер радиационного поведения СБИС определяется соотношением радиационно-чувствительных параметров ее элементов с учетом кратности узла и мощности спектра СБИС. В этом случае более точная оценка возможна при использовании понятия нечеткой кратности. Соотношение между функцией распределения плотности вероятности и критериальной функцией принадлежности (КФП) определяет, в конечном итоге, целесообразность использования функционально-логических моделей радиационного поведения СБИС применительно к каждому конкретному случаю. Такое сопоставление является необходимым этапом при анализе радиационной стойкости СБИС.

Дерево топологии моделирующей среды

Для оценки мощности спектра дерева топологии КМОП СБИС с применением нечетких чисел при радиационном воздействии в работе [2] были даны определения кратности узла и мощности спектра дерева СБИС. В этом случае более точная оценка стойкости БИС возможна при использовании понятия нечеткой кратности.

Как правило, с увеличением поглощенной дозы ионизирующего излучения амплитуда импульса логического элемента $l \in [0,1]$ уменьшается [3, 4], и собственная вероятность переключения элемента тоже уменьшается. Это уменьшение вероятности можно интерпретировать как бы увеличением порога срабатывания $l_{\Pi} \in [0,1]$.

В качестве примера на рис. 1 приведены экспериментальные результаты разброса $U_{\text{вых}}^0$ чипов КМОП цифровых интегральных микросхем оперативного запоминающего устройства (ЦИМС ОЗУ) серии 1617РУ6 и их транзисторных структур, которые соответствуют нормальному распределению Гаусса. Поскольку дисперсия σ^2 зависят от поглощенной дозы облучения, то по верхней оценки (6) можно установить и максимальную дозу облучения.

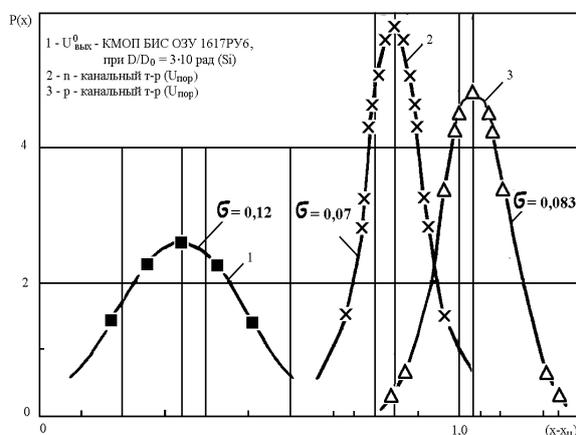


Рис. 1. Распределения усредненных по пластине $U_{\text{вых}}^0$ чипов КМОП ЦИМС ОЗУ 1617РУ6 от дозы (1), Упор n- и p- канальных МОП транзисторов (2, 3), полученные на ускорителе электронов с $E_e = 130$

(Fig. 1. Distributions of averaged over the chip logical zero output voltage CMOS VSLI RAM 1617RU6 from the dose (1), threshold voltage of n-channel and p-channel MOS transistors (2, 3) obtained at an electron accelerator with $E_e = 130$ keV)

Пусть из узла соединений логических элементов выходит n ветвей. Узел выбирается с максимальным количеством связей (критический узел). Кратность узла в случае $m = n$ реализуется при нормальной работе. При этом, если l_{Π} начинает приближаться к l , возникает зона неустойчивости, в которой элементы переключаются случайным образом и кратность узла становится неопределенной. Ее величина, как известно [5 - 7], может быть выражена нечетким числом. Для упрощения оценок в данной работе используются треугольные $(L - R)$ нечеткие числа.

В тоже время величины порогов l_{Π} распределены по некоторому закону $f(x)$ такому, что $f(x) \xrightarrow[x \rightarrow 1]{x \rightarrow 0} 0$ (Рис. 2). Так как математическое ожидание $\xi = l_{\Pi}$, то увеличение дозы облучения $\xi \rightarrow l$ и распределение смещается вправо (пунктир на Рис. 2).

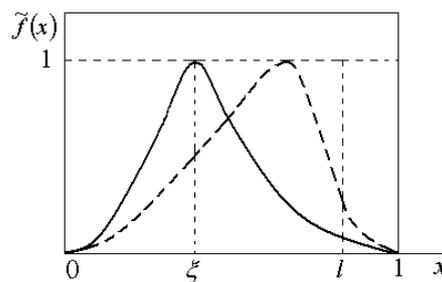


Рис. 2. Функция распределения порогового напряжения переключения логических элементов

$$\tilde{f}(x) = \frac{f(x)}{f(\xi)}$$

(Fig. 2. Logic threshold switching threshold function - $\tilde{f}(x) = \frac{f(x)}{f(\xi)}$)

Мода нечеткого числа, очевидно, зависит от величины:

$$S = \int_0^l f(x) dx,$$

а размытие от минимальной разности выражается соотношением [8]:

$$\min\{(S(\xi) - S(l)), (S_m(\xi) - S(l))\},$$

где S_m - максимальное значение S .

В этом случае рассмотрим нечеткие числа кратности узлов для двух функций распределения l_{Π} - Гаусса и Лапласа.

Для нормального закона распределения Гаусса справедливо равенство:

$$S_G = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \int_0^l e^{-\frac{(x-\xi)^2}{2\sigma^2}} dx = \Phi\left(\frac{\xi}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{l-\xi}{\sigma}\right), \quad (1)$$

где $\Phi(z)$ - интеграл вероятностей.

Справа в (1) функция симметричная относительно $\xi = \frac{l}{2}$ и при соотношении $\frac{l}{\sigma} > 4$ в этой точке имеется слабый максимум, равный $2\Phi \frac{l}{2\sigma}$.

Такая особенность функции позволяет использовать простую трапецеидальную аппроксимацию \tilde{S}_G (Рис. 3) [9], где $\alpha = \frac{l}{\sigma}$, $x = \frac{\xi}{\sigma}$, $\alpha > 4$, $0 \leq x \leq \alpha$.

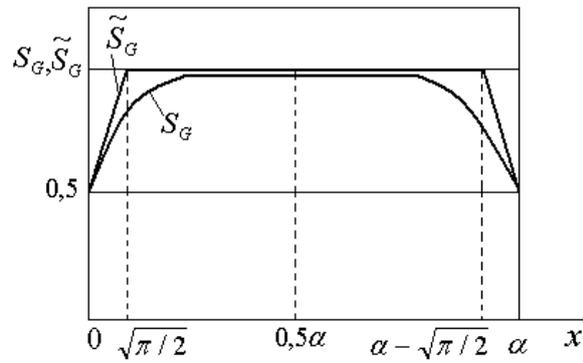


Рис. 3. Трапецидальная аппроксимация величины S_G для нормального закона распределения Гаусса
(Fig. 3. Trapezoidal fitting of S_G for the normal Gaussian distribution law)

В этом случае моду нечеткого числа можно записать в виде выражения:

$$M_G = [n \cdot \tilde{S}_G(x)], \quad (2)$$

Полученная размытая функция (2) имеет следующий вид:

$$\Delta_G = 2[n \cdot \min\{\{\tilde{S}_G(x) - 0,5\}, \{1 - \tilde{S}_G(x)\}\}], \quad (3)$$

где $\alpha - \sqrt{\pi}/2 < x < \alpha$.

В выражениях (2) и (3) $[Z]$ - целая часть $[Z]$.

Тогда из формул (2) и (3) получим, $(L - R)$ нечеткое число, которое представляется в виде равнобедренной функции с основанием Δ_G (Рис. 4).

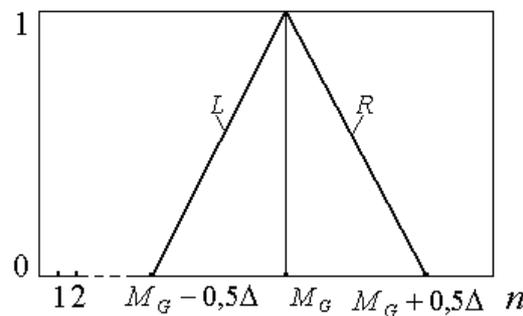


Рис. 4. Нечеткое число кратности узла соединения логических элементов
(Fig. 4. Multiplicity fuzzy number of the node connecting the logical elements)

Если $x < \alpha - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}}$, то размытие не включает n параметров и соответствующая этому случаю, поглощенная доза ионизирующего излучения считается катастрофической. В этом случае, предельная поглощенная доза определяется следующим равенствами:

$$x_{\max} = \alpha - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad \text{или} \quad \xi_{\max} = l - \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}} \approx l - 0,63\sigma. \quad (4)$$

Полученные выражения (4) справедливы для одного узла.

Для большого количества узлов дерева распределение Лапласа имеет:

$$S_L = \frac{1}{2\beta} \int_0^l e^{-\frac{|t-\xi|}{\beta}} dt = 1 - \frac{e^{x-\alpha} + e^{-x}}{2}, \quad (5)$$

где $x = \frac{\xi}{\beta}$, $\alpha = \frac{l}{\beta}$, $\alpha > x$, $\alpha > 4$.

Функция распределения Лапласа (5) аналогично распределению Гаусса (1) и ее можно аппроксимировать также трапецеидальной функцией \tilde{S}_L (Рис. 5).

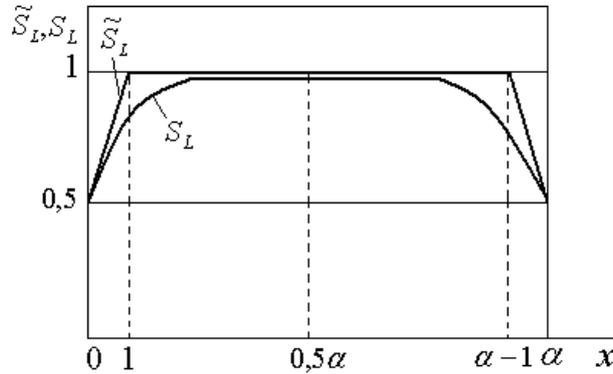


Рис. 5. Трапецеидальная аппроксимация S_L для распределения Лапласа
(Fig.5. Trapezoidal fitting S_L for Laplace distribution)

При этом мода и размытие нечеткого числа соответственно равно соотношениям [10]:

$$M_L = [n \cdot \tilde{S}_L(x)], \quad (6)$$

$$\Delta_L = 2[n \cdot \min\{\{\tilde{S}_L(x) - 0,5\}, \{1 - \tilde{S}_L(x)\}\}], \quad (7)$$

где $[Z]$ - целая часть Z , $\alpha - 1 < x < \alpha$.

Использование распределение функции Лапласа предпочтительнее, так как в области математического ожидания имеет значительно меньший разброс.

Для несимметричных законов распределения формулы (2) – (7) остаются справедливыми, но с другими пределами изменения обобщенного параметра x . Нормировка x осуществляется по некоторому характерному параметру размытия распределения [11].

Для оценки мощности дерева необходимо суммировать нечеткие числа, но среднее значения, как определено в работе [3], вычисляются через среднее значение мод и размытости.

В этом случае, средняя величина моды равна:

$$M_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^K M_i}{K}, \quad (8)$$

где K - число узлов в дереве, M_i - мода нечеткого числа i -го узла.

Средняя размытость определяется из соотношения:

$$\Delta_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^K \Delta_i}{K}, \quad (9)$$

где Δ_i - размытость нечеткого числа i -го узла.

Таким образом, мощность дерева выражается также нечетким числом, но мода и размытость которого, определяемые по формулам (8) и (9), не обязательно целые. Если размытость не захватывает максимальные значения мощности, приведенные в [3], то соответствующая поглощенная доза излучения считается катастрофической, причем меньше чем для одного узла [12].

Однако, данная оценка остается завышенной, так как не учитывается тот факт, что для узлов промежуточного уровня дерева, при не переключении какого-то элемента, кратность соответствующего узла считается равной 0.

Заключение

Обеспечение информационной безопасности КМОП СБИС в условиях ионизирующего излучения определяется конкретным спектром дерева топологии СБИС и соотношением радиационно-чувствительных параметров: кратности узлов, мощности спектра дерева, моды нечеткого числа. В этом случае соотношение между функцией распределения разброса и моды нечеткого числа определяет, в конечном итоге, целесообразность использования функционально-логических моделей радиационного поведения СБИС применительно к каждому конкретному случаю. Проведение такого сопоставления является необходимым этапом общей процедуры анализа радиационной стойкости СБИС. При этом следует отметить, что в разных диапазонах уровней или интенсивностей воздействия оценка мощности спектра дерева топологии СБИС может носить как нечеткий, так и вероятностный характер. При этом нечеткая кратность может задаваться в n -мерном пространстве с сохранением базовых параметров модели, а радиационные эффекты, возникающие в СБИС, при различных уровнях облучения, оцениваются в ней по изменению одного и того же параметра системы. Такая структура модели является вероятностно-нечеткой с операторами вероятностного типа, а критериальная функция принадлежности является суперпозицией статистической и детерминированной критериальной функцией принадлежности. При этом, определена взаимосвязь нечеткой кратности и вероятностной логик, позволяющая наиболее точно оценивать качество функционирования СБИС при воздействии радиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1 Frank M.J. Associativity in a class of operations on spaces of distribution functions. *Aequationes Math* 12 (1975), 121-144.
- 2 V.M. Barbashov, N.S. Trushkin Evaluation performance of digital integrated circuits while exposed to radiation. 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 151 012011.
- 3 В.М. Барбашов, Б.И. Подлепецкий, Н.С. Трушкин Моделирование радиационной надежности цифровых устройств на функционально-логическом уровне. Датчики и системы. – 2016.– №4, с. 54-57.
- 4 Гретцер Г. Общая теория решеток. М.: Мир, 1982. 456 с.
- 5 Нечеткие множества и теория возможностей. Под ред. Р.Р. Ягера. М.: Радио и связь, 1986. 408 с.
- 6 Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. Под ред. Д.А.Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.
- 7 Денисенко В.В. Компактные модели МОП – транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 408 с.
- 8 Барбашов В.М., Трушкин Н.С. Функционально-логическое моделирование качества функционирования ИС при воздействии радиационных и электромагнитных излучений. *Микроэлектроника*. 2009, том 38, № 1, с. 34-47.
- 9 A.V. Sogoyan, A.I. Chumakov, A.Yu. Nikiforov Method for Predicting CMOS Parameter Degradation Due to Ionizing Radiation with Regard to Operating Time and Conditions. *Russian Microelectronics*. 1999. V. 28. № 4. P. 224-235.
- 10 V. M. Barbashov, N.S. Trushkin, and O. A. Kalashnikov “Deterministic and nondeterministic failure models of LSI circuits exposed to radiation. *Russian Microelectronics*, vol. 44, no. 5, pp. 312-315, 2015.
- 11 A. V. Sogoyan, and V. A. Polunin, “A model for the formation of leakage currents in the dielectrics of MOS structures under the effect of heavy charged particles. *Russian Microelectronics*, vol. 44, no. 1, pp. 54-59, 2015.
- 12 Барбашов В.М. Моделирование функциональных отказов цифровых систем при воздействии радиации. Датчики и системы. – 2011. - № 6. – С. 29-34.

REFERENCES:

- [1] Frank M.J. Associativity in a class of operations on spaces of distribution functions. *Aequationes Math* 12 (1975), 121-144.
- [2] V.M. Barbashov, N.S. Trushkin Evaluation performance of digital integrated circuits while exposed to radiation. 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 151 012011.
- [3] V.M. Barbashov, B.I. Podlepetsky, N.S. Trushkin Modeling the Radiation Reliability of Digital Devices at a Functional-Logical Level. *Sensors and Systems*. - 2016, no. 4, pp. 54-57. (in Russian).
- [4] Gratzner G. the General theory of lattices. M.: Mir, 1982. 456 p. (in Russian).
- [5] Fuzzy sets and the theory of possibilities, Ed. R.R. Yager. M.: Radio and Communication, 1986, p.408. (in Russian).
- [6] Fuzzy sets in control and artificial intelligence models. edited by D. A. Pospelov. M.: Nauka, 1986. 312 p. (in Russian).
- [7] Denisenko V. V. Compact models of MOS - transistors for SPICE in micro - and nanoelectronics. M.: FIZMATLIT, 2010. - 408 p. (in Russian).
- [8] VM Barbashov, NS Trushkin Functional-logical modeling of the quality of IS functioning under the influence of radiation and electromagnetic radiation. *Microelectronics*. 2009, Vol. 38, No. 1, pp. 34-47. (in Russian).
- [9] A.V. Sogoyan, A.I. Chumakov, A.Yu. Nikiforov Method for Predicting CMOS Parameter Degradation Due to Ionizing Radiation with Regard to Operating Time and Conditions. *Russian Microelectronics*. 1999. V. 28. № 4. P. 224-235.
- [10] V. M. Barbashov, N.S. Trushkin, and O. A. Kalashnikov “Deterministic and nondeterministic failure models of LSI circuits exposed to radiation. *Russian Microelectronics*, vol. 44, no. 5, pp. 312-315, 2015.
- [11] A. V. Sogoyan, and V. A. Polunin, “A model for the formation of leakage currents in the dielectrics of MOS structures under the effect of heavy charged particles. *Russian Microelectronics*, vol. 44, no. 1, pp. 54-59, 2015.
- [12] VM Barbashov Modeling of functional failures of digital systems under the influence of radiation. *Sensors and systems*. - 2011. - No. 6. - pp. 29-34. (in Russian).

*Поступила в редакцию – 16 Октября 2017 г. Окончательный вариант – 05 февраля 2018 г.
Received – October 16, 2017. The final version – February 05, 2018.*