

O.A. Kalashnikov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
31, Kashirskoe sh., Moscow, 114509, Russian Federation, e-mail: oakal@spels.ru

Numerical simulation of digital VLSI total dose functional failures

Keywords: VLSI, total dose failures, functional-logical simulation

The technique for numerical simulation of digital VLSI total dose failures is presented, based on fuzzy logic sets theory. It assumes transfer from boolean logic model of a VLSI with values $\{0,1\}$ to fuzzy model with continuous interval $[0,1]$, and from boolean logic functions to continuous minimax functions. The technique is realized as a calculation system and allows effective estimating of digital VLSI radiation behavior without experimental investigation.

O.A. Калашников

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шоссе, 31, г. Москва, 115409, Россия, e-mail: oakal@spels.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТКАЗОВ ЦИФРОВЫХ СБИС

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

Рассмотрена методика расчетно-экспериментального моделирования дозовых радиационных отказов цифровых СБИС, основанная на методе критериальных функций принадлежности. Метод предполагает переход от булевой логической модели с множеством значений сигналов $\{0,1\}$ к логической модели сигналов, значения которых принадлежат непрерывному интервалу $[0,1]$ и от булевых логических функций к непрерывным минимаксным функциям. Предложенная методика реализована в виде системы расчетного функционально-логического моделирования, позволяющей эффективно оценить радиационное поведение цифровых СБИС без проведения экспериментальных исследований.

Воздействие стационарного ионизирующего излучения (ИИ) на цифровые сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) может приводить к их отказам, связанным с постепенной деградацией характеристик элементов, в том числе – функциональным. Экспериментальные исследования таких отказов должны проводиться с учетом реальных условий эксплуатации СБИС и связаны со значительными материальными и временными затратами.

В качестве альтернативы широко применяются различные методы расчетно-экспериментального моделирования. Имеющиеся в настоящее время системы расчетного моделирования дозовых отказов цифровых СБИС используют либо электрические расчеты, что делает их практически непригодными для сколько-нибудь сложных СБИС, либо вероятностные модели, определяющие реакцию всей СБИС по реакции наименее стойкого ее элемента. Поэтому актуальна задача разработки и практической реализации методов расчетно-экспериментального моделирования функциональных радиационных отказов цифровых СБИС.

При исследовании работоспособности сложных систем, таких как цифровые СБИС, целесообразно проводить моделирование их поведения на функционально-логическом уровне. Такой подход традиционно применяется при экспериментальном моделировании, тогда как большинство расчетных методов ограничивается учетом влияния ионизирующего излучения на электрические характеристики МОП транзистора.

Экспериментальные и немногочисленные расчетные методики оценки работоспособности СБИС на функциональном уровне ориентированы, как правило, на электрическое моделирование с использованием метода наихудшего случая, когда о стойкости СБИС судят по стойкости ее самого чувствительного к воздействию излучения элемента. Однако, как следует из полученных по этим же методикам результатов, работоспособность СБИС обычно существенно зависит от режима ее функционирования в

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТКАЗОВ ЦИФРОВЫХ СБИС

процессе облучения. В некоторых режимах наиболее чувствительный элемент не оказывает влияния на функционирование СБИС, а значит, и на ее стойкость.

Учет режима работы СБИС с использованием традиционных подходов к моделированию радиационных отказов потребовал бы создания электрических моделей СБИС в целом, что оказывается практически нереализуемым. Поэтому возникает необходимость моделирования отказов на функционально-логическом уровне описания цифровых СБИС. Такое описание объектов позволило бы, во-первых, получить более точные оценки уровней сохранения работоспособности СБИС и, во-вторых, дать рекомендации по повышению стойкости с использованием аппаратно-алгоритмических методов, реализующих функции системы при работе ее элементов преимущественно в более стойких режимах.

Таким образом, основными задачами моделирования дозовых радиационных отказов цифровых СБИС являются определение работоспособности этих СБИС и влияния на нее режимов функционирования.

Предназначенная для решения этих задач предлагаемая методика расчетного моделирования опирается на метод критериальных функций принадлежности (КФП), основанный на теории нечетких множеств [1]. Сущность применения метода КФП для расчетного моделирования радиационных функциональных отказов цифровых СБИС отражают следующие принципы [2].

1. Непрерывный характер протекающих в элементах СБИС при облучении процессов и, как следствие, параметрический характер их отказов требуют для анализа этих процессов перехода от булевой логической модели с множеством значений сигналов $\{0,1\}$ к логической модели сигналов, значения которых принадлежат непрерывному интервалу $[0,1]$.

2. Воздействие ИИ на элемент моделируется введением дополнительного входного сигнала КФП (также с диапазоном значений $[0,1]$), значение которого зависит от уровня воздействия (таких дополнительных сигналов может быть несколько).

3. Для определения функции принадлежности надо воспользоваться соотношением:

$$\mu(D) = \begin{cases} \frac{|P_{out} - S|}{2 \times \max |P_{out} - S|}, & \text{если } S(D) = 0, \\ 1 - \frac{|P_{out} - S|}{2 \times \max |P_{out} - S|}, & \text{если } S(D) = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где P_{out} – выходная характеристика элемента, S – пороговая (булева) характеристика элемента, D – параметр, характеризующий уровень воздействия (т.е. поглощенная доза). Значение $S = 0$ (1) соответствует значениям логического элемента P_{out} , интерпретируемым как состояние логического нуля (единицы). Форма функции принадлежности зависит от критерия выделения состояний логического нуля и единицы моделируемого логического элемента, поэтому функцию $\mu(D)$ называют критериальной функцией принадлежности.

4. Логика добавления сигнала $\mu(D)$ должна быть такова, чтобы при отсутствии радиационного воздействия элемент выполнял свою логическую функцию, и сигналы на его выходах принадлежали булевому множеству $\{0,1\}$.

5. Булевы логические функции трансформируются в непрерывные минимаксные функции:

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТКАЗОВ ЦИФРОВЫХ СБИС

$$\begin{aligned}
И : \quad y &= x_1 \cap x_2 \rightarrow y = \min(x_1, x_2), \\
ИЛИ : \quad y &= x_1 \cup x_2 \rightarrow y = \max(x_1, x_2), \\
НЕ : \quad y &= \neg x_1 \rightarrow y = 1 - x_1.
\end{aligned}
\tag{2}$$

Таким образом, система булевых логических уравнений, отражающих работу СБИС, преобразуется в систему нечетких логических уравнений [3]:

$$y = \varphi(x, z, \mu(D)), \tag{3}$$

где x , y и z – векторы входных, выходных и внутренних переменных СБИС соответственно, $\mu(D)$ – набор КФП, описывающих радиационное поведение элементов, D – уровень воздействия, φ – вектор нечетких функций.

Рассмотрим в качестве примера радиационную модель логического элемента 3ИЛИ-НЕ (рис. 1.а), радиационный отказ которого проявляется как деградация уровня логической "1" (рис. 1.б). Для получения радиационной модели в соответствии с методом КФП все булевы сигналы элемента заменяются на непрерывные, и добавляется дополнительный вход μ , который должен будет отражать радиационный отказ элемента. Если в качестве критерия принадлежности сигнала к "0" или к "1" выбрать уровень $U_{пит}/2$, то, в соответствии с (1), получим зависимость μ от уровня воздействия, также показанную на рис. 1.б.

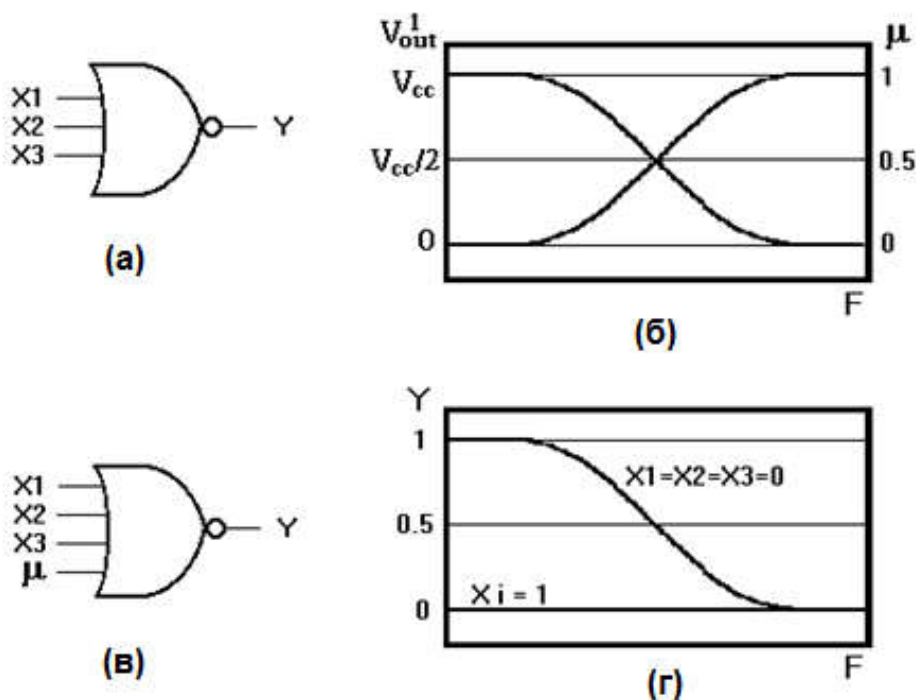


Рис. 1. Создание нечеткой модели логического элемента: а – элемент 3ИЛИ-НЕ, б – зависимость выходного напряжения логической «1» от поглощенной дозы и соответствующая функция принадлежности, в – нечеткая модель, г – рассчитанные выходные логические напряжения

На рис. 1.в показано условное графическое обозначение полученной модели элемента 3ИЛИ-НЕ. Значение выходного сигнала этого элемента определяется, в соответствии с (2), функцией

$$y = 1 - \max(x_1, x_2, x_3, \mu(D)). \tag{4}$$

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТКАЗОВ ЦИФРОВЫХ СБИС

Выражение (4) позволяет легко рассчитать зависимость выходного сигнала от уровня воздействия при различных наборах входных сигналов (рис. 1.г). Легко видеть, что в отсутствие воздействия полученная функционально-логическая модель дает верные булевы значения выходного сигнала.

Идентификация параметров радиационных функционально-логических моделей элементов цифровых СБИС заключается в определении зависимостей функций принадлежности этих элементов от уровня воздействия [4]. При этом приходится решать следующие задачи:

- определение типов радиационных отказов элемента и количества соответствующих им функций принадлежности;
- определение необходимых зависимостей характеристик элемента от уровня воздействия;
- определение критерия принадлежности сигнала к логическому состоянию "0" или "1" (обусловлен главным образом технологическими нормами);
- расчет функций принадлежности.

Две первые задачи, представляющие наибольшую сложность, могут решаться как экспериментальным путем, так и расчетными методами [5].

Предложенная методика реализована в виде системы расчетного функционально-логического моделирования на основе языка VHDL [6] (возможна реализация и на основе других средств и языков моделирования). Реализация заключается в перегрузке логических операций для вещественных аргументов в соответствии с (2). Такой подход не требует существенной переработки самих моделей цифровых СБИС, созданных в процессе их проектирования, необходимо лишь добавить в описание соответствующие КФП. Поэтому процедуры расчетного моделирования дозовых отказов таких цифровых СБИС как системы на кристалле (СнК), микропроцессоры, ПЛИС не имеют ограничений по числу элементов, узлов и режимов работы СБИС и позволяют эффективно оценить радиационное поведение самых сложных СБИС без проведения экспериментальных исследований [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Е.Р. Аствацатурьян, Н.С. Трушкин. Многоуровневое иерархическое моделирование радиационных эффектов в БИС // препринт МИФИ, 015-93, 1993, 24 с.
2. Е.Р. Аствацатурьян, В.А. Беляев, Н.С. Трушкин. Функционально-логическое моделирование радиационного поведения цифровых устройств // препринт МИФИ, 016-93, 1993, 28 с.
3. В.М. Барбашов, Н.С. Трушкин, О.А. Калашников. Детерминированные и недетерминированные модели отказов БИС при воздействии радиации // Микроэлектроника, 2015, том 44, №5, С. 1-4.
4. V.M. Barbashov. Methods of construction of the criterial membership function for the prediction of functional failures of large-scale integrated circuits under the effect of radiative and electromagnetic radiations // Russian Microelectronics, vol. 39, no. 2, pp. 100-112, 2010.
5. V.V. Belykov, A.I. Chumakov, A.Y. Nikiforov, V.S. Pershenkov, P.K. Skorobogatov, and A.V. Sogoyan, Prediction of local and global ionization effects on ICs: The synergy between numerical and physical simulation // Russian Microelectronics, vol. 32, no. 2, pp. 105-118, 2003.
6. V.M. Barbashov. Modeling of functional failures in digital systems under the radiation effect // Automation and Remote Control, vol. 74, no. 4, pp. 671-678.
7. O.A. Kalashnikov, and A.Y. Nikiforov. TID behavior of complex multifunctional VLSI devices // in Proc. 29th Int. Conf. on Microelectronics, MIEL 2014, Belgrade, Serbia, May 2014, pp. 455-458.

REFERENCES:

1. E.R. Astvatsaturyan, N.S. Trushkin. Multi-level hierarchical modeling of radiation effects in LSI // preprint MEPI, 015-93, 1993, 24 p.
2. E.R. Astvatsaturyan, V.A. Belyaev, N.S. Trushkin. Functional and logical modeling of radiation behavior of digital devices // preprint MEPI, 016-93, 1993, 28 p.
3. V.M. Barbashov, N.S. Trushkin, O.A. Kalashnikov. Deterministic and non-deterministic model of LSI failure when exposed to radiation // Microelectronics, 2015, Volume 44, №5, pp 1-4.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗОВЫХ
РАДИАЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТКАЗОВ ЦИФРОВЫХ СБИС

4. V.M. Barbashov. Methods of construction of the criterial membership function for the prediction of functional failures of large-scale integrated circuits under the effect of radiative and electromagnetic radiations // Russian Microelectronics, vol. 39, no. 2, pp. 100-112, 2010.
5. V.V. Belykov, A.I. Chumakov, A.Y. Nikiforov, V.S. Pershenkov, P.K. Skorobogatov, and A.V. Sogoyan, Prediction of local and global ionization effects on ICs: The synergy between numerical and physical simulation // Russian Microelectronics, vol. 32, no. 2, pp. 105-118, 2003.
6. V.M. Barbashov. Modeling of functional failures in digital systems under the radiation effect // Automation and Remote Control, vol. 74, no. 4, pp. 671-678.
7. O.A. Kalashnikov, and A.Y. Nikiforov. TID behavior of complex multifunctional VLSI devices // in Proc. 29th Int. Conf. on Microelectronics, MIEL 2014, Belgrade, Serbia, May 2014, pp. 455-458.