

ПОРТФЕЛЬ РЕДАКЦИИ

БИТ

V.M. Barbashov, N.S. Trushkin

*National Research Nuclear University МЕРФИ, 115409, Moscow, Kashirskoe sh., 31,
e-mail: VMBarbashov@МЕРФИ.RU, e-mail: Ntrushkin@gmail.com*

The digital ICs reliability assessment under the influence of radiation

Key words: criteria-based membership function, automatic Brouwer, topological probabilistic models

The article considers digital ICs safe operation predicting methods under the influence of radiation based on fuzzy digital automaton and topological probabilistic models for assessing their performance. While ICs radiation behavior actual nature is determined by the specific ratio of the radiation-sensitive parameters of its elements and taking into account the impact of their statistical dispersion. ICs failures modeling methods under exposed to radiation, which are based on models of fuzzy digital automaton Brauer and probabilistic reliability of the machine.

В.М. Барбашов, Н.С. Трушкин

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское ш., 31,
e-mail: VMBarbashov@МЕРФИ.RU, e-mail: Ntrushkin@gmail.com*

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ ИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ

Ключевые слова: критериальная функция принадлежности, автомат Брауэра, топологические вероятностные модели

Рассмотрены методы прогнозирования безопасной работы цифровых ИС при воздействии радиации, основанные на нечетком цифровом автомате и топологических вероятностных моделях оценки их работоспособности. При этом реальный характер радиационного поведения ИС определяется конкретным соотношением радиационно-чувствительных параметров ее элементов и учетом влияния их статистического разброса. Предложены методы моделирования отказов ИС при воздействии радиации, которые основаны на модели нечеткого цифрового автомата Брауэра и вероятностного надежностного автомата.

Введение

Функциональные и параметрические отказы ИС при воздействии радиации в ряде случаев определяются статистическим разброс пороговых уровней отказа для однотипных образцов. В условиях воздействия радиации используется модель цифрового автомата с привлечением аппарата теории вероятности. Для булевых надежностных сетей использования моделей внутренних элементов ИС в пространстве состояний, построенных для, где выполняются аксиомы булевой решетки [1]. В случае, когда необходим учет физических механизмов отказа ИС, построение функционально-логической модели предполагает переход от аксиоматики булевой решетки к аксиоматике векторной решетки с соответствующей заменой алгебраических операций на операции «минимум», «максимум» и «дополнение» для каждого $x \in X$ [3]. Таким образом, реальный характер радиационного поведения ИС определяется конкретным соотношением радиационно-чувствительных параметров ее элементов с учетом влияния

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ ИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ

разброса. Заметим, что соотношение между функцией распределения плотности вероятности разброса и критериальной функцией принадлежности (КФП) определяет, в конечном итоге, целесообразностью использования функционально-логических моделей радиационного поведения ИС применительно к каждому конкретному случаю. При этом необходимо иметь в виду, что параметры функций распределения характеризующих неконтролируемые статистические факторы сами по себе являются зависимыми от радиации. 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 излучения модель ИС может носить как нечеткий, так и вероятностный характер.

Модельное описание

При облучении ИС, как известно, изменяется значение логического нуля «0» и «1» [1]. Это приводит к тому, что возникают распределения амплитуд напряжений логических уровней «0» и «1», как показано на рис. 1. При этом для оценки характера распределений необходимо расширять множество модальностей (уровней логических сигналов) до континуума $x \in [0, 1]$. В этом случае континуальное множество предпочтительно описывать нечеткой логикой (нечеткие множества), в данном случае накладывается еще аппарат теории вероятности [2].

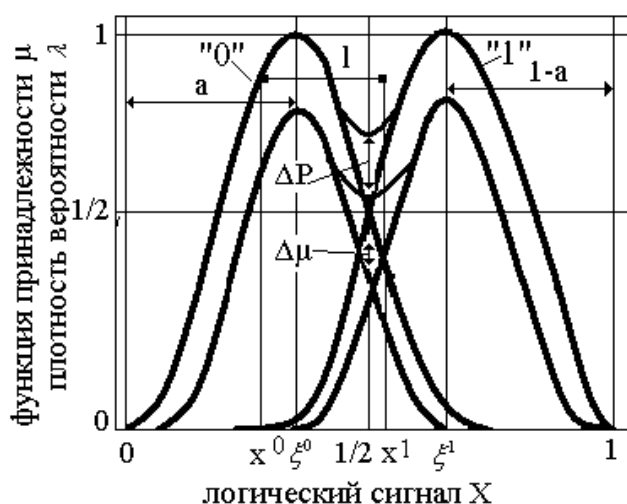


Рис. 1. Нормальное распределения изменения логических уровней «0» и «1» при воздействии радиации

При увеличении дозы ионизирующего излучения γ эти распределения сближаются (показано стрелками), при этом разность уровней логических сигналов l уменьшается. Работоспособность логического элемента (ЛЭ) можно охарактеризовать величиной l . Но это случайная величина - вероятность распределения можно рассчитать следующим образом:

Пусть x^0 (рис. 1) некоторое значение уровня логического нуля, а x^1 - значение логической единицы такое, что $x^1 - x^0 = l$. Тогда вероятность l равна:

$$P_l = P^0(x^0) \cdot P^1(x^1) = P^0(x^0) \cdot P^1(x^0 + l),$$

где P^0 берется по распределению «0», а P^1 - по распределению «1». При этом необходимы ограничения $0 \leq x^0 < \frac{1}{2}$, $1 \geq x^0 + l > \frac{1}{2}$, т.е. $\frac{1}{2} - l < x^0 \leq 1 - l$, если $l > \frac{1}{2}$, то

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ ИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ

левая часть неравенства автоматически выполняется. При $l = 1$ получаем вырожденный случай, когда $x^0 = 0$ и $P_l \approx 0$.

Для определения количества работоспособных логических элементов при заданном радиационном воздействии, рассмотрим среднее значение вероятности P_l при отмеченных ограничениях при этом x^0 будет принимать значение текущей переменной x . Тогда:

$$\bar{P}_l = 2 \int_{\max\left\{0, \frac{1}{2} - l\right\}}^{\min\left\{\frac{1}{2}, 1 - l\right\}} P^0(x) \cdot P^1(x + l) dx, \quad (1)$$

Величина l представляет собой критериальную функцию принадлежности (КФП) нечеткого множества работоспособных логических элементов. При этом глобальная оценка работоспособности всей электронной системы определяется как нечеткая вероятность:

$$\tilde{P} = \int_0^1 l \cdot \bar{P}_l dl, \quad (2)$$

Если требуется дать оценку решения системой определенного класса задач, в которой задействовано определенное нечеткое подмножество A элементов, то по соответствующей модельной траектории [3] рассматриваются частные распределения $\{\xi_A, \sigma_A^2\}$ и вычисляются интегралы (1), (2).

Для вычисления интеграла (1) предпочтительнее использовать компактную модель [4] со следующими допущениями: пусть ξ^0 равно a (рис. 1), тогда $\xi^1 = 1 - a$, $\sigma^0 = \sigma^1 = \sigma$. При увеличении поглощенной дозы облучения уменьшается параметр a и увеличивается σ , где σ^2 - дисперсия.

В качестве примера использование такой модели для дозовых эффектов в структурах КМОП ИС, чаще всего, наблюдается прямой характер зависимости дисперсии разброса от уровня облучения, которые соответствуют нормальному распределения Гаусса (3 – 6) (Рис. 2). Поэтому в разных диапазонах уровней воздействия модель объекта может носить как нечеткий, так и вероятностный характер [5]. В целом можно предположить, что для поверхностных эффектов зачастую предпочтительнее использование вероятностных моделей. Однако для однозначной оценки радиационного поведения требуется совместный учет параметров, которые описываются нечеткими и вероятностными моделями.

Для нормального распределения Гаусса имеем:

$$\begin{cases} P^0(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\xi^0}{\sigma}\right)^2} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2} \\ P^1(x+l) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x+l-\xi^1}{\sigma}\right)^2} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x+l^1-1+a}{\sigma}\right)^2} \end{cases}, \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получим:

$$\bar{P}_l = \frac{1}{\pi\sigma^2} \int_{\max\{0, \frac{1}{2}-l\}}^{\min\{\frac{1}{2}, 1-l\}} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{x+l-1+a}{\sigma}\right)^2\right]} dx, \quad (4)$$

После преобразования интеграл (4) принимает вид:

$$\bar{P}_l = \frac{2}{\pi\sigma^2} e^{-\frac{[2a+l-1]^2}{2\sigma^2}} \cdot \int_0^{\frac{1-|1-2l|}{4}} e^{-\frac{z^2}{\sigma^2}} dz = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} e^{-\frac{[2a+l-1]^2}{2\sigma^2}} \cdot \operatorname{erf}\left[\frac{1-|1-2l|}{4\sigma}\right], \quad (5)$$

Подставляя (5) в (2) и после преобразований получаем:

$$\tilde{P} = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{1}{2}} \left(\nu e^{-\frac{(2a-1+\nu)^2}{2\sigma^2}} + (1-\nu) e^{-\frac{(2a-\nu)^2}{2\sigma^2}} \right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\nu}{2\sigma}\right) d\nu, \quad (6)$$

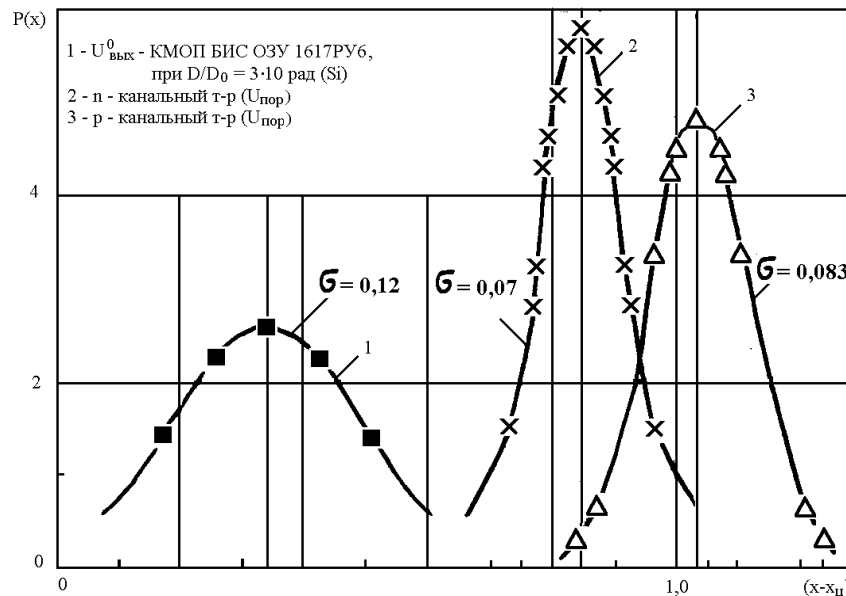


Рис. 2. Распределения усредненных по пластине $U_{\text{вых}}^0$ чипов КМОП БИС ОЗУ 1617РУ6 от дозы (1), Упор n- и p- канальных МОП транзисторов (2, 3), полученные на ускорителе электронов с $E_e = 130$ кэВ

Для получения верхней оценки (6) можно воспользоваться неравенством $\operatorname{erf}(x) \leq 1$, тогда после преобразований имеем:

$$\tilde{P} \leq \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{1}{2\sqrt{2}\cdot\sigma}} e^{-(\nu-|q|)^2} d\nu, \quad (7)$$

где $q = \frac{4a-1}{2\sqrt{2}\cdot\sigma}$.

Следует иметь в виду, что q может быть разного знака при естественном изменении a в диапазоне $\left[0, \frac{1}{2}\right]$.

Интеграл в формуле (7) можно выразить через табулированные функции erf следующим образом:

$$\tilde{P} \leq \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{1 - |4a - 1|}{2\sqrt{2} \cdot \sigma} + \operatorname{erf} \frac{|4a - 1|}{2\sqrt{2} \cdot \sigma} \right). \quad (8)$$

Так как σ и a зависят от поглощенной дозы облучения, то по верхней оценки (8) можно установить и верхнюю дозу облучения.

На рис. 3 приведен анализ полученных теоретических результатов КФП и их сравнение с экспериментальными результатами. Характер изменения кривых КФП (μ) и пороги потери работоспособности БИС ОЗУ 1617РУ6 по функциональным и параметрическим критериям совпадают с учетом статистического разброса $U_{\text{пор}}(D)$ (партия - 10 штук) [6].

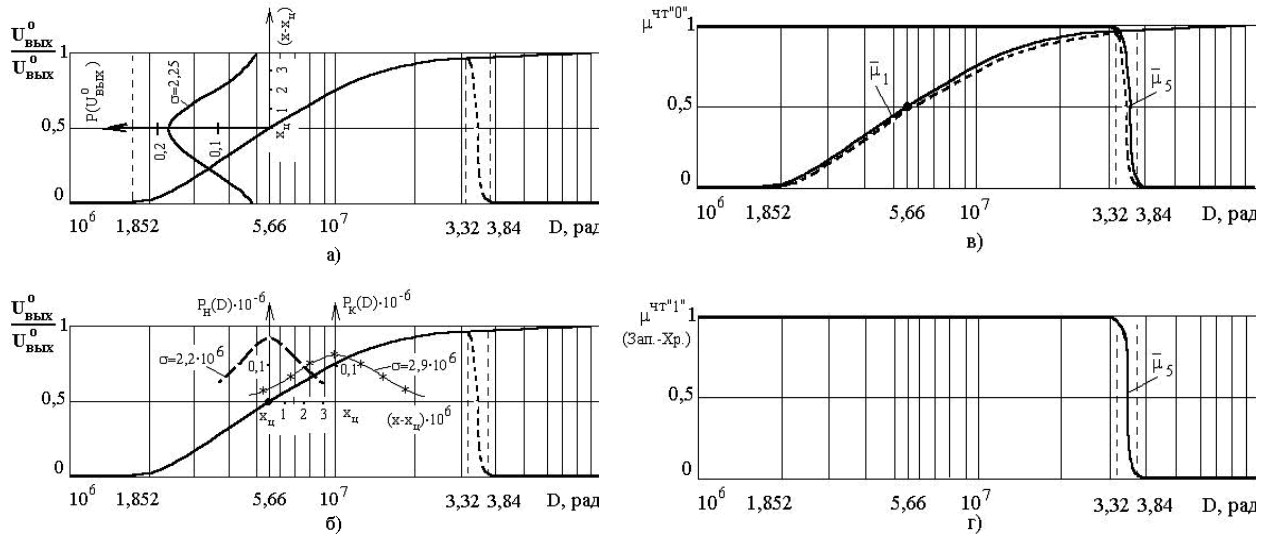


Рисунок 3. Расчетные и экспериментальные зависимости КФП ($\mu_{1,5}$) с учетом статистического разброса логических уровней выходного каскада (ВК) КМОП БИС ОЗУ (1617РУ6) в режимах «чтение», «запись» и «хранение» от поглощенной дозы ИИ: а, б – экспериментальные зависимости; в, г – расчетные зависимости

Для аналитического представления взаимосвязи вероятностных и порядковых моделей для моделирования функциональных отказов ИС можно воспользоваться аппроксимациями симметричных функций.

Тогда, очевидно, что $f(x)$ должна удовлетворять условию:

$$\int_{x_0}^{x_0 + \sigma} f(x) dx = 1, \quad (9)$$

Тогда при анализе интеграла (9) можно положить $x_0 = 0$, а сам интеграл (9) преобразуется к виду:

$$J = 2 \int_{\Delta l}^{\sigma} f(x) \cdot f(x - \Delta l) dx, \quad (10)$$

где $\Delta l = |a - l|$.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ ИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ

Множество l делится на два подмножества: $a - \sigma \leq l \leq a$ и $a \leq l \leq a + \sigma$. В первом случае $\Delta l \geq 0$, а во втором $\Delta l \leq 0$. Однако формула (10) является универсальной, пригодной для первого и второго подмножеств.

При $x_0 = 0$, с учетом (9), формула (10) запишется в виде:

$$A \int_0^{\sigma} \varphi(x) dx = 1, \quad (11)$$

Равенство (11) должно выполняться при любом $\sigma \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$. В этом случае если,

$\frac{\partial A}{\partial \varphi} = 0$ (т.е. φ не зависит от σ), то:

$$\frac{\partial A}{\partial \varphi} \cdot \int_0^{\sigma} \varphi(x) dx + A \varphi(\sigma) = 0,$$

Из формулы видно, что $\varphi(\sigma) = 0$, $\frac{\partial A}{\partial \varphi} = 0$, следовательно A также не зависит от σ .

Но тогда равенство (11) не может выполняться для $\forall (\sigma > 0)$. Следовательно $\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} \neq 0$. В

этом случае можно показать, что функция $\varphi(x)$ должна быть вида: $\varphi\left(\frac{\alpha}{\sigma} x\right)$, где α - корень $\varphi(\xi) = 0$, т.е. $\varphi(\alpha) = 0$, $\alpha > 0$.

Тогда выражение (11) примет вид:

$$A \frac{\sigma}{\alpha} \int_0^{\alpha} \varphi(\xi) d\xi = 1,$$

откуда - $A = \frac{\alpha}{\sigma \cdot \int_0^{\alpha} \varphi(\xi) d\xi}$.

Таким образом, интеграл (11) переписется в виде:

$$\frac{\alpha}{\sigma} \cdot \frac{1}{\left(\int_0^{\alpha} \varphi(\xi) d\xi\right)^2} \cdot \int_b^{\alpha} \varphi(\xi) \cdot \varphi(\xi - b) d\xi, \quad (12)$$

где $-b = \frac{\alpha}{\sigma} \Delta l$.

Интеграл (12) позволяет оценить плотность распределения Δl (а, следовательно, l) при изменении α и σ , зависящие от дозы облучения.

Рассмотрим значения интеграла (12) для полусинусоидальной аппроксимации, т.е.

$\varphi(\xi) = \sin \xi$, $\alpha = \pi$. Тогда (12) примет вид: $\int_b^{\pi} \sin \xi \cdot \sin(\xi - b) d\xi$,

где $b = \frac{\pi}{\sigma} \cdot \Delta l$.

Из этого следует, что интеграл принимает следующий вид:

$$\int_0^{\pi} \sin \xi \cdot \sin(\xi - b) d\xi = \frac{1}{2} [(\pi - b) \cos b + \sin b],$$

и окончательно (12) переписывается в виде:

$$\frac{\alpha}{\sigma} \cdot \frac{1}{\left(\int_0^{\alpha} \varphi(\xi) d\xi \right)^2} \cdot \int_b^{\alpha} \varphi(\xi) \cdot \varphi(\xi - b) d\xi = \frac{\pi}{8\sigma} [(\pi - b) \cos b + \sin b],$$

$$J = \frac{\pi}{2\sigma} [(\pi - b) \cos b + \sin b].$$

Зависимость J от $\frac{\Delta l}{\sigma}$ представлена на рис. 4.

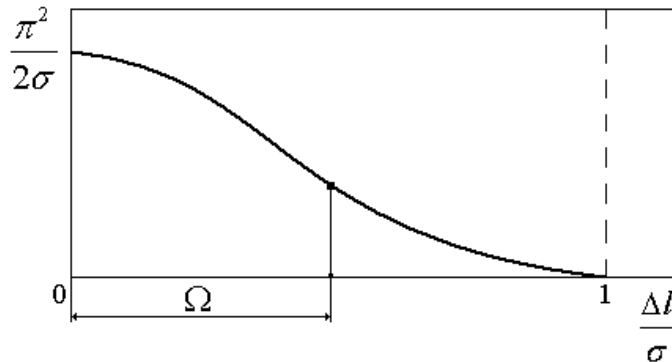


Рис. 4. График плотности распределения Δl при изменении a и σ для полусинусоидальной аппроксимации, зависящей от поглощенной дозы облучения

То, что максимум распределения приходится на $\Delta l = 0$ ($l = a$) очевидно, т. к. при $l = a - x_1$ и x_2 приходится на математические ожидания. Однако важно, чтобы дисперсия распределения $l \cdot \Omega$ были минимальной. В распределение Ω принята точка перегиба функции $J(b)$. Для данной аппроксимации $\Omega \approx 0,35$ отсюда следует, что $a - 0,35\sigma \leq l \leq a + 0,35\sigma$.

Для других симметричных распределений Ω мало отличается.

Если рассмотреть среднюю величину плотности распределения (т.е. среднее значения величины плотности распределения логического сигнала цифровых элементов), то нужно вычислить интеграл:

$$\int_0^{\sigma} \int_{\Delta l}^{\sigma} f(x) \cdot f(x - \Delta l) dx d(\Delta l), \quad (13)$$

Используя вышеприведенные обозначения (14) приводится к виду:

$$\frac{1}{\left(\int_0^{\alpha} \varphi(\xi) d\xi\right)^2} \int_0^{\alpha} \int_b^{\alpha} \varphi(\xi) \cdot \varphi(\xi - b) d\xi db, \quad (14)$$

В этом случае оказывается, что если функция φ удовлетворяет условиям (12) интеграл (14) является константой, равной 0,5.

Отсюда следует, что средняя величина плотности распределения логических «1» или «0» имеет вид:

$$F(\Delta l)_{cp} = \frac{0,5}{\sigma}, \quad (15)$$

Определения предельной поглощенной дозы из вероятностного расчета определяется выражением (15).

Из теории нечетких множеств можно рассчитать предельную поглощенную дозу облучения логических элементов ИС, используя понятие нечеткой плотности вероятности (нечеткая вероятность). Если в качестве критериальной функции принадлежности (КФП) принять l , то нечеткую плотность вероятности можно определить следующим образом:

$$\tilde{F}(l) = \frac{1}{\left(\int_0^{\alpha} \varphi(\xi) d\xi\right)^2} \int_0^{\alpha} l \int_b^{\alpha} \varphi(\xi) \cdot \varphi(\xi - b) d\xi db, \quad (16)$$

Преобразовав (16) получим соотношение в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{F}(l) \cong & \frac{\sigma a}{\pi \left(\int_0^{\alpha} \varphi(\xi) d\xi\right)^2} \int_0^{\alpha} \int_b^{\alpha} \varphi(\xi) \cdot \varphi(\xi - b) d\xi db - \\ & - \frac{\sigma}{\pi \left(\int_0^{\alpha} \varphi(\xi) d\xi\right)^2} \int_0^{\alpha} b \int_b^{\alpha} \varphi(\xi) \cdot \varphi(\xi - b) d\xi db, \quad (17) \end{aligned}$$

Используя результат (15) и то, что Δl разного знака для полной плотности вероятности второй интеграл в (9) опускаем. Откуда нечеткая плотность вероятности имеет вид:

$$\tilde{F}_{\text{полная}}(l)_{cp} = \frac{a}{2\pi}, \quad (18)$$

Сравнивая (15) и (18) видно, что вероятностный расчет определяется дисперсией σ , а нечеткий – сближением математических ожиданий a .

Заключение

В настоящей работе в заключении следует отметить, что реальный характер работоспособности ИС определяется конкретным соотношением детерминированных и недетерминированных радиационно-чувствительных параметров элементов с учетом влияния их статистического разброса. В этом случае соотношение между функцией распределения плотности вероятности разброса и критериальной функцией принадлежности определяет, в конечном итоге, целесообразность использования

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ ИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ

функционально-логических моделей радиационного поведения ИС применительно к каждому конкретному случаю. Проведение такого сопоставления является необходимым этапом общей процедуры анализа радиационной стойкости ИС. При этом следует отметить, что в разных диапазонах уровней или интенсивностей воздействия модель ИС может носить как нечеткий, так и вероятностный характер. При этом, определена взаимосвязь нечеткой и вероятностной логик, позволяющая наиболее точно оценивать качество функционирования БИС при воздействии радиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гретцер Г. Общая теория решеток. М.: Мир, 1982. 456 с.
2. Нечеткие множества и теория возможностей / Под ред. Р.Р.Ягера. М.: Радио и связь, 1986. 408 с.
3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/ Под ред. Д.А.Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.
4. Денисенко В.В. Компактные модели МОП – транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике.М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 408 с.
5. 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.
6. Барбашов В.М. Моделирование функциональных отказов цифровых систем при воздействии радиации//Датчики и системы. – 2011. - № 6. – С. 29-34.

REFERENCES:

1. Gratzner G. the General theory of lattices. M.: Mir, 1982. 456.
2. Fuzzy sets and theory of possibilities / edited by R. R. Yager. M.: Radio and communication, 1986. 408 p.
3. Fuzzy sets in management models and artificial intelligence/ ed. by D. A. Pospelov. M.: Nauka, 1986. 312 p.
4. Denisenko V. V. Compact models of MOS transistors for SPICE in micro - and nanoelectronics.M.: FIZMATLIT, 2010. – 408 p.
5. Barbashov V. M., Trushkin N. With. Functional-logical modeling of the quality of operation of the IP when exposed to radiation and electromagnetic radiation// Microelectronics. 2009, volume 38, No. 1, pp. 34-47.
6. Barbashov V. M. Modeling of the functional failures of digital systems when exposed to radiation//Sensors and systems. – 2011. - No. 6. – S. 29-34.