



ПОРТФЕЛЬ РЕДАКЦИИ

БИТ

Барбашов В. М. (к. т. н., доцент)

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КРИТЕРИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИОННЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Рассматриваются методы построения критериальных функций принадлежности (КФП) для функционально-логического моделирования функциональной безопасности БИС при воздействии радиационных и электромагнитных излучений, основанные на модели нечеткого цифрового автомата Брауэра (АБ). Приводятся алгоритмы и рекомендации по методам обеспечения и прогнозирования функциональной безопасности БИС.

Функциональная сложность современных БИС, требование к обеспечению функциональной безопасности при наличии многообразия радиационных эффектов в элементах приводят к необходимости совместного использования и сопоставления моделей, не только имеющих разнообразную математическую структуру, но и оперирующих переменными различной природы. Сильная зависимость характера их проявления в схеме от режима работы, технологии изготовления элементной базы и способа их схемотехнической реализации приводит к необходимости использования функционально-логического моделирования безопасности качества функционирования при воздействии радиационных и электромагнитных излучений. Все эти модели описывают различные аспекты поведения одного и того же объекта и основаны на модели нечеткого цифрового автомата Брауэра. Исходными параметрами в модели АБ является критериальная функция принадлежности [1].

1. Система параметров для оценки качества функционирования работоспособности БИС

При использовании функционально-логических моделей, формализованных на основе теории нечетких множеств, основная задача связана с выбором метода построения соответствующих КФП. При этом прогнозирование стойкости БИС к различным радиационным эффектам требует множества КФП, соответствующих каждому типу излучения, и выбранных критериальных параметров БИС. Наиболее важные КФП показаны на рис. 1.

С точки зрения изменений характеристик в зависимости от вида воздействия и особенностей поведения БИС КФП (μ) делятся на группы и определяются отдельно для каждого типа ионизирующего излучения (ИИ) (стационарное, импульсное). В большинстве конкретных случаев можно выделить доминирующий параметр или группу параметров БИС, изменение значений которых по отношению к пределам установленных норм приводит к нарушению работы устройства во время и после действия ИИ. В нормативно-технической документации принято деление параметров БИС на три основные группы: статические, динамические и функциональные. Поэтому

и КФП целесообразно делить на аналогичные группы и определять отдельно для каждого типа ИИ. В случае стационарного ИИ, при определении функционирования БИС во время облучения, КФП делятся на статические и динамические. После действия ИИ для определения КФП следует ориентироваться на характер физических процессов, происходящих в БИС после облучения (эффект отжига) [2, 3]. В этом случае КФП элементной базы БИС описывается статическими и динамическими характеристиками с учетом их изменения после действия ИИ.

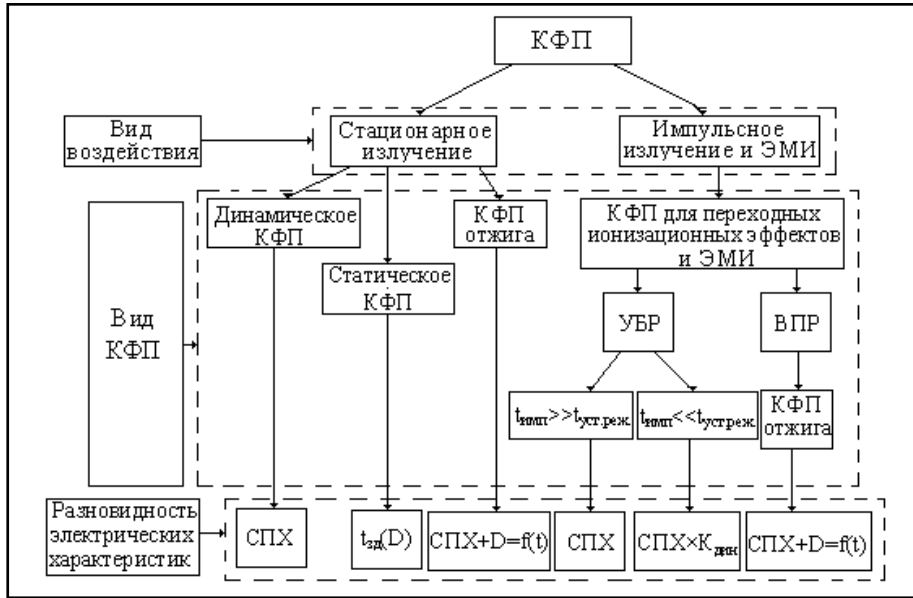


Рис. 1. Классификация КФП в зависимости от видов воздействия на ИС

При анализе переходных эффектов в случае однородного равновесного энерговыделения в зависимости от концентрации неравновесных носителей n и от длительности импульса ИИ КФП делятся на две группы:

1. КФП уровня бессбойной работы (УБР), где различают два основных случая:

- диапазон «длинных» импульсов ИИ, где n не зависит от длительности импульса и равна стационарному значению n , которое, в свою очередь, определяется мощностью дозы ИИ, временем жизни и геометрическими размерами областей базы элементов БИС [1]:

$$n_{cm} = q_0 \rho_\gamma \tau \lambda (W/L), \quad (1)$$

где q_0 — фактор ионизации; ρ_γ — мощность поглощения дозы; τ — время жизни неравновесных носителей; λ — коэффициент сбора носителей; W , L — толщина рассматриваемой области и диффузионная длина неосновных носителей;

- диапазон «коротких» импульсов ИИ характеризуется линейной зависимостью $n=f(t_u)$ и полностью определяется мощностью дозы и длительностью импульса [4]:

$$n = q_0 \cdot \rho_\gamma \cdot t_u, \quad (2)$$

где t_u — длительность импульса ИИ.

Значение коэффициента пересчета для расчета статических переключательных характеристик (СПХ) в диапазоне «коротких» и «длинных» импульсов ИИ для «короткого» импульса оценивается из (1), (2):

$$K = \frac{U_{вых}(n)}{U_{вых}(n_{cm})},$$

где $U_{вых}$ — выходное напряжение логического элемента (ЛЭ) БИС. В этом случае СПХ при «коротком» импульсе ИИ описывается следующим соотношением для ЛЭ БИС:

$$F_{СПХ} = K [U_{вых}(U_{вх})].$$



2. КФП времени потери работоспособности (ВПР).

Проведенный анализ показывает, что время восстановления работоспособности БИС ($t_{вос}$) и время «отжига» при возможных дозовых эффектах ($t_{отж}$) адекватно отражают поведение БИС после воздействия ИИ на функционально-логическом уровне ее описания. В этом случае КФП_{отж} БИС эквивалентна КФП_{впр} и описывается следующим соотношением:

$$\mu_{впр} = \mu_{отж} = K(T_{обл} \cdot \mu_{обл} + \bar{T}_{отж} \cdot \mu_{отж}),$$

где $\mu_{впр}, \mu_{отж}$ – КФП; $T_{обл}, \bar{T}_{отж}$ – время облучения и «отжига» соответственно; K – коэффициент, характеризующий условие облучения БИС (актив, пассив, режимы функционирования).

Полученные виды и типы КФП позволяют без трансформации логических структур и логики функционирования БИС перейти к анализу и оценке радиационной стойкости БИС на функционально-логическом уровне их описания.

2. Построения КФП для базовых логических элементов БИС при различных видах воздействия

При прогнозировании радиационной стойкости БИС на функционально-логическом уровне их описания особо актуальны проблема выбора метода построения КФП и разработка соответствующего математического аппарата.

В [5] предлагается параметрическое представление КФП. В соответствии с данным методом, вид функции $\mu(D, r)$ задается аксиоматически с последующей аппроксимацией. Так, например, в условиях возникновения остаточных радиационных эффектов в транзисторных структурах БИС в случае $\mu(D, r) \sim \exp r$; $I_{ip}^0, I_{ip}^1 = 0$, тогда при $I_{ip}^1 < I_{вых} < I_{ip}^0$ имеет место соотношение:

$$\mu_i(I_{вых}, D) = \exp\left(-\left|\frac{I_{ip}^1 - I_{вых}}{I_{ip}^0 - I_{вых}}\right|\right),$$

где I_{ip}^1, I_{ip}^0 – граничные выходные токи транзистора БИС, отвечающие за единичное и нулевое состояние элемента; $I_{вых}$ – ток выходного электрода транзистора, соответствующий неопределенному логическому состоянию элемента (Рис. 2).

Такое представление функций принадлежности является компактным, обеспечивает простоту построения их на практике, однако связано с исследованием адекватности используемых функций аппроксимации (\exp, Ln и т. д.) и соответственно аналитических описаний функции принадлежности. При этом такое представление функции в общем случае является неопределенным и, как правило, не приводит к необходимой точности при описании поведения цифровых устройств и тем самым ограничивает область применения этого метода.

Исследования асимптотических оценок вероятностных и порядковых моделей качества функционирования показали тесную взаимосвязь между радиационной стойкостью и внутренней неоднородностью ее элементов по этому показателю. В соответствии с [1], нечеткая логика Заде, которая по своим свойствам является моделью со структурой метрических решеток де Моргана, может быть задана мерой внутренней неопределенности состояний системы при разных D по отношению к критерию r_{ij} , определяющему область работоспособности и являющемуся показателем размытости $d(r_{ij})$.

Показатель размытости $d(r_{ij})$ – это строго возрастающий с увеличением размытости нечеткого множества (μ) симметричный и аддитивный функционал, принимающий максимальное значение в точке $\mu=0,5$ и определяющийся соотношением:

$$d(r_{ij}) = G(\mu_{ij}(D)),$$

где G – строго возрастающая функция на $[0; 0,5]$ и $G(0) = G(1) = 0, G(\mu_{ij}) = G(\mu_{ij}(D))$.

Следует отметить, что поскольку частным случаем G является функция Шеннона $G_{ш}(P) = \log_2(P^{-P} \cdot (1-P)^{(1-P)})$, то $d(r_{ij})$ представляет в теории нечетких множеств характеристику,



аналогичную электронную в теории информации, и удовлетворяет условию $d=0$. В соответствии с [6], для метрических решеток нечетких множеств показатель размытости может быть представлен в следующей форме:

$$d(r_{ij}) = m[\rho(0, P) - \rho(r_{ij}, \bar{r}_{ij})] = m\rho(r_{ij}, \bar{r}_{ij}) = 2m\rho(A, A_{0,5}) = mK_H,$$

где m – нормированный множитель; P – базовый носитель модели уровня (r_{ij}, r_{ijn}) ; ρ – расстояние между двумя нечеткими множествами r_{ij} и r_{ijn} ; $r_{0,5}$ – подмножество уровня 0,5.

При этом, используя геометрическую трактовку показателя размытости как функцию расстояния симметричной метрики Хемминга [7], что соответствует линейному росту функции G на $[0, 0,5]$, сам показатель определяется формулой

$$d(P, Q) = \int_a^b |\mu_P(x) - \mu_Q(x)| dx,$$

где $\mu_P(x)$ и $\mu_Q(x)$ – функции принадлежности элементов нечетким множествам P и Q соответственно; a, b – граница области определения функций принадлежности.

В этом случае можно записать, что

$$d(P) = \frac{2}{b-a} \int_a^b |\mu_P(r) - \bar{\mu}_P(r)| dx,$$

где $\bar{\mu}_P$ – функция принадлежности подмножества, расположенного на наименьшем евклидовом расстоянии от данного нечеткого подмножества (подмножества уровня 0,5) [7]:

$$\bar{\mu}_P(r) = \begin{cases} 0, & \text{если } \mu_P(r) < 0,5 \\ 1, & \text{если } \mu_P(r) > 0,5 \\ 0, & \text{если } \mu_P(r) = 0,5 \end{cases},$$

где при $d(P)=0$ в случае нулевой нечеткости ($\mu \in [0,1]$) и $d(P)=1$ в случае максимальной нечеткости ($\bar{\mu}_P(r)=0$, если $\mu_P(r)=0,5$) множества P .

Таким образом, показатель размытости нечеткого множества P определяется величиной коэффициента нечеткости:

$$K_H = \left| \mu_{\bar{P}}(x_i) - \mu_P(x_i) \right| = 2 \left| \mu_P(x_i) - \mu_{P,0,5}(x_i) \right|, \quad (3)$$

в интервале значений x_i , на котором строится функция принадлежности.

В [1, 8] предлагается метод построения функции принадлежности на основе описания параметрического характера поведения логических элементов БИС при воздействии ИИ. При этом вид функции характеризуется неидеальной формой его переключательной характеристики при непрерывных физических механизмах радиационных эффектов, в то время как при определении $\mu_{P,0,5}(x_i)$ форма функции принадлежности есть двоичная аппроксимация функции $\mu_P(x_i)$. Таким образом, величина K_H характеризует неточность булевой модели ЛЭ по сравнению с моделью, в которой учитывается непрерывность изменения выходной характеристики. Значение приведенного коэффициента неточности K_H на основании вышеизложенного определяется согласно выражению (3):

$$K_H = \frac{|V_{\text{вых}} - S|}{\max |V_{\text{вых}} - S|}, \quad (4)$$

где $V_{\text{вых}}$ – выходная характеристика ЛЭ; S – пороговая характеристика ЛЭ.

Функция принадлежности с учетом (3), (4) в однопараметрическом случае имеет следующий вид:

$$\mu_{\bar{P}}(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_H(x_i), & \text{если } S(x_i) = 0 \\ 1 - \frac{1}{2} K_H(x_i), & \text{если } S(x_i) = 1 \end{cases}. \quad (5)$$



Здесь $S=0(1)$ интерпретируется как состояние логического «0» («1»). При этом функция принадлежности характеризует степень принадлежности переменной x_i нечеткому подмножеству $P[a,b]$ в котором каждому состоянию на выходе ЛЭ сопоставляется КФП $\mu_\rho(x_i)$, характеризующая истинность принадлежности его логическому состоянию «0» или «1» по выбранным критериям. В качестве переменной, в зависимости от условий работы, могут выступать: поглощенная доза и мощность дозы γ -излучения, флюенс нейтронов и электронов, время, температура и т. д.

Исходными параметрами БИС для функционально-логических моделей радиационного поведения служат зависимости критериальных параметров БИС от уровня воздействия, которые могут быть получены из моделей элементов электрического уровня их описания расчетным путем и экспериментально. В зависимости от характера взаимодействия излучения с материалом БИС и технологического разброса параметров элементов, процессы могут быть выражены в виде нечетких функций и отношений между статистическими характеристиками, описываемыми вероятностными распределениями, и детерминированными показателями радиационного поведения элементов БИС при помощи функций принадлежности. Взаимосвязь нечеткости и неопределенности в моделях радиационного поведения БИС различных технологий может быть отражена в двух случаях. Во-первых, когда статистический разброс характеристик элементов БИС перекрывает диапазон неопределенности их состояний, модель радиационного поведения БИС описывается надежностной моделью с учетом теории структурных функций для определения вероятности состояния логического элемента. Во-вторых, доминирующее влияние на функцию работоспособности оказывает нечеткость, а разброс характеристик элементов БИС практически не влияет на форму функции принадлежности. Анализ взаимосвязи нечеткости и неопределенности моделей радиационного поведения БИС осуществляется на основе критериальных отношений характеристик работоспособности:

$$\psi_i(\vec{D}, \vec{r}) = \begin{cases} \max \left| \int_R \mu(\vec{D}, \vec{r}) f(\vec{D}, \vec{r}) dr - \int_{R'} f(\vec{D}, \vec{r}) dr \right|, & \text{если } f(\vec{D}, \vec{r}) - \text{доминирует} \\ \max \left| \mu(\vec{D}, \vec{r}) - \int_{R'} \mu(\vec{D}, \vec{r}) f(\vec{D}, \vec{r}) dr \right|, & \text{если } \mu(\vec{D}, \vec{r}) - \text{доминирует} \end{cases},$$

где $\mu(\vec{D}, \vec{r})$ – КФП логического устройства в зависимости от уровня внешнего воздействия D и параметра r ; $f(\vec{D}, \vec{r})$ – зависимость функции распределения параметра логического устройства от уровня воздействия; R, R' – соответственно области определения параметра и параметра, на котором значения $\mu(\vec{D}, \vec{r}) \neq 0$.

Взаимное сопоставление функций распределения ошибок моделирования, обусловленное соответствующим пренебрежением нечеткости по сравнению с неопределенностью и наоборот, приводит к следующему выражению (Рис. 3):

$$\psi_i(\vec{D}, \vec{r}) = \begin{cases} \int_R f(\vec{D}, \vec{r}) dr, & \text{если } f(\vec{D}, \vec{r}) - \text{доминирует} \\ \mu(\vec{D}, \vec{r}), & \text{если } \mu(\vec{D}, \vec{r}) - \text{доминирует} \end{cases}. \quad (6)$$

Взаимное сопоставление $\mu(\vec{D}, \vec{r})$ и $f(\vec{D}, \vec{r})$ позволяет сделать вывод о предпочтительности моделирования данной группы эффектов в ИС различных технологий в классе нечетких или вероятностных моделей.

Если не выполняется ни одно из условий (6), то при построении нечеткой модели учитывается статистический разброс характеристик ЛЭ БИС во всем диапазоне внешних воздействий [9, 10]. При этом расчет ЛЭ должен приводиться для наихудшего и наилучшего случаев значений КФП:

$$\psi_i(\vec{D}, \vec{r}) = \inf_i \mu_i(\vec{D}, \vec{r})$$

$$\psi_j(\vec{D}, \vec{r}) = \sup_j \mu_j(\vec{D}, \vec{r})$$



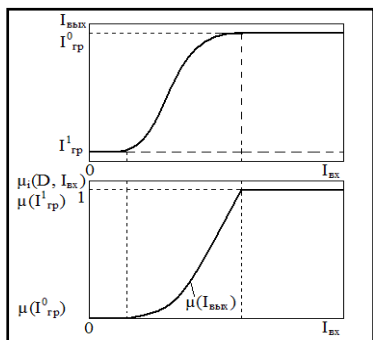


Рис. 2. Построение критериальной функции принадлежности

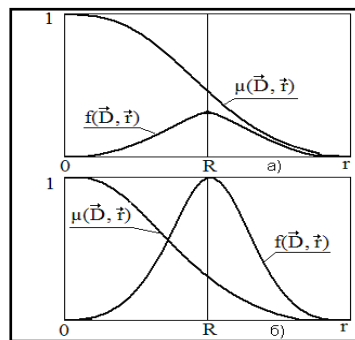


Рис. 3. Сопоставление зависимости КФП и функции распределения в зависимости от уровня воздействия и параметра r при доминировании нечеткости (а) и неопределенности (б) характеристик ЛЭ

Основной частью прогнозирования радиационной стойкости БИС, согласно приведенному выше утверждению, является построение КФП (μ_{ij}). Методы построения КФП определяются в зависимости от видов воздействия, критериальных параметров и режима функционирования БИС. При этом рассмотренная выше методика построения КФП относится к базовой и определяет основные принципы ее описания. Частные алгоритмы расчета КФП, где за критерий отказа берутся статические и динамические параметры ЛЭ БИС, а также «отжиг» таких параметров при стационарном и импульсном излучении приводятся в работе [5].

3. Заключение

Представленные в работе результаты можно сформулировать следующим образом.

Предложенный метод построения функции принадлежности на основе описания параметрического характера поведения логических элементов БИС при воздействии ИИ является достаточно простым и удобным в применении.

Дана обоснованная система параметров для оценки качества функционирования работоспособности БИС в зависимости от условия и вида облучения. КФП в этом случае определяется отдельно для каждого вида излучения и ориентируется на характер физических процессов.

Предложен метод построения КФП: КФП — «отжига» ЛЭ БИС при стационарном облучении и КФП при импульсном облучении.

Определен алгоритм прогнозирования информационной безопасности БИС в виде функциональных радиационных отказов, зависящих от входных состояний ЛЭ БИС, на основе метода КФП.

Полученные теоретические результаты позволяют обоснованно определять степень защиты информации и допустимые границы области эксплуатации БИС в каждом конкретном случае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Аствацатурьян Е. Р., Беляев В. А., Скоробогатов П. К. Использование метода критериальных функций принадлежности для теоретического моделирования и экспериментального исследования радиационного поведения АПОИ на базе ИМС высокой степени интеграции // Специальная техника средств связи. Серия общетехническая. 1987. Вып. 11. С. 3–12.



2. *Winokur P. S., Kerris K. G., Marper L.* Predicting CMOS inverter response in nuclear and space environments // IEEE Trans. 1983. Vol. NS-30. № 6. P. 4270–4275.
3. *Барбашов В. М., Китаев С. С., Раткин А. В.* Исследование релаксации заряда КМДП/КНС БИС ОЗУ // Электронные устройства предварительной обработки данных / Под ред. Т. М. Агаханяна. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 13–17.
4. *Агаханян Т. М., Аствацатурьян Е. Р., Скоробогатов П. К.* Радиационные эффекты в интегральных микросхемах. М.: Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.
5. *Аствацатурьян Е. Р., Барбашов В. М., Беляев В. А., Гурарий А. Л.* Моделирование остаточных радиационных эффектов в БИС на функционально-логическом уровне // Сборник докладов V межотраслевого семинара «Проблемы создания полупроводниковых приборов, ИС и РЭА на их основе, стойких к ВВФ». М.: АДС «Радтех», 1991. С. 30–31.
6. *Месарович М., Такахага Я.* Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978. — 331 с.
7. *Котман А.* Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982. — 432 с.
8. *Аствацатурьян Е. Р., Барбашов В. М., Беляев В. А., Гурарий А. Л.* Использование метода КФП для прогнозирования функциональных радиационных отказов ЗУ аппаратуры средств связи // Специальная техника средств связи. Сер. Общетехническая. 1991. Вып. 1. С. 111–120.
9. *Аствацатурьян Е. Р.* Особенности учета неточности моделей при анализе стабильности сложных электронных устройств физического эксперимента // Электроника для экспериментальной физики / Под ред. Т. М. Агаханяна. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 3–8.
10. *Барбашов В. М., Трушкин Н. С.* Взаимосвязь вероятностных и порядковых моделей при моделировании функциональной безопасности БИС // Безопасность информационных технологий. 2008. № 3. С. 90–95.

