

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КРИТЕРИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИС

В связи с широким применением больших интегральных схем (БИС) в специализированной аппаратуре актуальной является задача прогнозирования функциональных отказов и разработки методов повышения стойкости при воздействии электромагнитного излучения (ЭМИ).

Характерной особенностью БИС являются их значительная логическая сложность, структурная, технологическая, схмотехническая неоднородность по критерию стойкости к ЭМИ и, как следствие, сильная зависимость от режима работы при облучении. При описании таких БИС, как правило, используют представление ее модели в виде композиции двух цифровых автоматов — управляющего и операционного. Такая модель не отражает зависимость стойкости при воздействии ЭМИ от структурной, схмотехнической организации БИС и технологии производства. В связи с этим практически невозможно получить конкретные параметры, позволяющие оценить влияние на стойкость к ЭМИ, заложенные схмотехнические и структурные решения БИС.

Такая задача реализуема, если перейти к использованию метода критериальных функций принадлежности (КФП) в виде автомата Брауэра, в котором каждому логическому состоянию БИС сопоставляется функция принадлежности, характеризующая истинность принадлежности его логическому «0» или «1», определяемые по критериям работоспособности [1].

По характеру влияния на параметры элементов БИС первичные и вторичные эффекты делятся на обратимые и необратимые.

Первичные эффекты вызывают временную потерю работоспособности БИС под действием наведенных токов и напряжений, которые проявляются в форме функционального сбоя, изменения внутреннего состояния элемента, выхода режима БИС за допустимые пределы. В этом случае после воздействия одиночных импульсов напряжения (ОИН), наведенных ЭМИ, происходит восстановление работоспособности элемента после потери работоспособности [2].

Остаточные эффекты могут иметь параметрический характер или форму катастрофического отказа.

Таким образом, влияние ОИН на параметры БИС проявляется в следующих формах: время потери работоспособности; деградация электрических параметров и, как следствие, функциональный отказ; снижение надежности; катастрофический отказ.

Для получения конкретных параметров, позволяющих оценить импульсную электрическую прочность (ИЭП) в зависимости от заложенных схмотехнических и структурных решений БИС, необходимо перейти к использованию метода КФП в виде автомата Брауэра.

КФП для остаточных эффектов определяется как:

$$\mu^j(F) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_H^j(F), \text{ при } U_{\text{вх}} < U_{\text{вх.кр}}(F) \\ 1 - \frac{1}{2} K_H^j(F), \text{ при } U_{\text{вх}} \geq U_{\text{вх.кр}}(F) \end{cases}, \quad (1)$$

где $K_H^j(F) = \frac{|U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}}, F) - U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})|}{\max|U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}}, F) - U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})|}$ — коэффициент неточности, который определяется как нормированный модуль разности между измененной под действием ОИН статической переключательной характеристикой ($U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}}, F)$) и первоначальной ($U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$); где j — логическое состояние, для которого строится КФП.



В случае временной потери работоспособности БИС КФП представляет функцию $\mu(t, U_m)$, где t — время с момента начала ОИН, с амплитудой $U(0)$:

$$\mu(t, U_m) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_H(t, U_m) \\ 1 - \frac{1}{2} K_H(t, U_m) \end{cases}, \quad (2)$$

где $K(t, U_m) = \frac{|U_{\text{вых}}(t, U_m) - S(t, U_m)|}{\max|U_{\text{вых}}(t, U_m) - S(t, U_m)|}$; $S(t, U_m)$ — пороговая реакция логического элемента.

Для сравнения ИЭП отдельных узлов БИС различных реализаций вводятся специальные характеристики в виде функций: работоспособности, чувствительности и неоднородности [3].

Функция работоспособности характеризует степень отличия результата функционирования после воздействия ОИН от результата функционирования исправной БИС:

$$\psi(U_m) = \xi(\bar{X}^n, \bar{D}^n, \bar{\mu}(U_m)) \oplus \xi(\bar{X}^n, \bar{D}^n, \bar{\mu}(0)), \quad (3)$$

где ξ — нечеткие функции; n — номер цикла функционирования БИС; \bar{X} — входные сигналы; \bar{D} — информационные сигналы; $\bar{\mu}$ — вектор КФП.

В граничных точках функция работоспособности принимает вид:

$$\psi = \begin{cases} 0, \text{ если БИС полностью работоспособна;} \\ 1, \text{ если БИС полностью неработоспособна.} \end{cases} \quad (4)$$

Для прогнозирования ИЭП БИС на схемотехническом и структурном уровнях описания модель автомата Брауэра имеет вид:

$$\bar{Y} = \bar{Q}(\bar{X}, \bar{Z}, \bar{\mu}(U_m)), \quad (5)$$

где \bar{X}, \bar{Y} — векторы входных и выходных переменных цифровых устройств, соответственно; \bar{Z} — вектор внутреннего состояния БИС; $\bar{\mu}(U_m)$ — набор КФП, описывающий поведение элементов при воздействии ОИН; \bar{Q} — вектор нечетких функций.

В соответствии с выражением (3), функция работоспособности отдельных узлов БИС по j -му выходу при i -м входном наборе сигналов и m -м внутреннем состоянии имеет вид:

$$\psi_j(\bar{X}_i, \bar{Z}_m, U_m) = \mathcal{Q}_j(\bar{X}_i, \bar{Z}_m, \bar{\mu}(U_m)) \oplus \mathcal{Q}_j(\bar{X}_i, \bar{Z}_m, \bar{\mu}(0)). \quad (6)$$

Обобщенная функция работоспособности (ФР) цифрового устройства на основе выражения (6) имеет вид:

$$\psi(U_m) = \max \psi_j(U_m) = \max \psi(\bar{X}_i, \bar{Z}_m, U_m). \quad (7)$$

БИС реализуется на большом количестве элементов, характеристики каждого из которых в различной степени влияют на значения ФР всего цифрового устройства. Для выявления таких элементов вводится функция чувствительности ФР (ψ_j). Чувствительность ФР к варьированию характеристик отдельных элементов (μ_i) можно определить через отношения приращения ФР, связанные с изменением этих величин, которые в однопараметрическом случае имеют следующий вид:

$$\Delta_j(\mu_{ir}, U) = \frac{H[\psi_j(\mu_{ir}(U'), \bar{\mu}_i(U')) \psi_j(\mu_{ir}(U^0), \bar{\mu}_i(U^0))]}{H[\mu_{ir}(U'), \mu_{ir}(U^0)]}, \quad (8)$$

где $\bar{\mu}_i$ — векторный параметр или переменная, по которой варьируется координата μ_{ir} ; ψ_j — ФР цифрового устройства.

Выражение (8) используется для локализации доминирующего элемента (ДЭ), обуславливающего отказ в данном логическом состоянии цифрового устройства в целом. Элемент цифрового устройства, имеющий наихудшую ИЭП, т. е. $\max \mu_i(U_m)$, характеризуется как критический элемент (КЭ). Граничные значения для $\Delta_j(\mu_{ir}, U)$ определяются следующим образом:

$$\Delta_j(\mu_{ir}, U) = \begin{cases} 0, \text{ если элемент с } \mu_{ir} \text{ не доминирует при заданном } U; \\ 1, \text{ если элемент с } \mu_{ir} \text{ доминирует при заданном } U. \end{cases} \quad (9)$$



В ходе проведенных исследований была выявлена ярко выраженная зависимость ИЭП от структурной организации БИС, когда критический и доминирующий элементы различны в пределах заданного статистического технологического разброса [4]. Для обеспечения стойкости структурно-неоднородной БИС по критерию ИЭП, помимо традиционных методов, необходимо использовать структурные методы, связанные с изменением структурной организации БИС при сохранении реализуемой булевой функции. Выражение для оценки уровня структурной неоднородности БИС имеет следующий вид:

$$\Delta U^c = \sup H|U_{кэ}(\bar{X}_i), U_{дэ}(\bar{X}_i)|, \quad (10)$$

где $U_{кэ}(\bar{X}_i), U_{дэ}(\bar{X}_i)$ – уровень нарушения работоспособности критических и доминирующих элементов при i -м режиме функционирования.

Таким образом, процесс прогнозирования функциональных отказов можно представить в виде определенной последовательности этапов:

- оценка существующей элементной базы БИС с точки зрения определения КФП по критерию ИЭП;
- определение функции работоспособности БИС по выражениям (3), (5)–(7);
- определение функции чувствительности по формуле (8);
- оценка уровня структурной неоднородности из выражения (10);
- окончательное определение уровня ИЭП как отдельных блоков БИС, так и БИС в целом с учетом приведенных выше исходных данных.

Для апробации предложенного метода КФП определения стойкости к ОИН и ее характеристик были проведены экспериментальные исследования по оценке ИЭП КМОП БИС ОЗУ 537РУ6 по выводам питания в широком диапазоне изменения U_m . Результаты испытаний стойкости БИС по выводам питания приведены на рис. 1. Анализ проведенных исследований показал наличие четырех типов нарушений работоспособности, которые проявлялись в следующей последовательности относительно единой шкалы амплитуд ОИН: информационные сбои, параметрические отказы, защелкивание паразитных четырехслойных структур и необратимые повреждения, вызванные развитием вторичных эффектов (рис. 1).

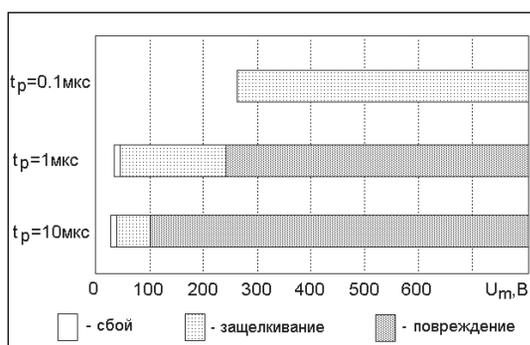


Рис. 1. Типы и области нарушений работоспособности БИС ОЗУ 537РУ6 при воздействии ОИН различной длительности

Итак, основные итоги данной работы состоят в следующем.

1. Предложенные модели прогнозирования ИЭП БИС на основе метода КФП позволяют задать межуровневые связи функционально-логического и электрического уровней для решения задачи оценки качества функционирования. Такие модели обеспечивают возможность задания в них в явной форме зависимости ИЭП элементов цифровых устройств от режима работы, конструктивно-технологических, схмотехнических и архитектурных особенностей их реализации.



2. Использование нечетких функционально-логических моделей позволяет не только прогнозировать возможность возникновения различного рода функциональных отказов, характерных для сложных цифровых устройств, но и реализовать новый класс параметров (индексы сравнения: работоспособность, чувствительность и неоднородность), характеризующих ИЭП этих устройств с позиции их функционально-логического описания.

3. На основании проведенных оценок показано, что ЭМИ современных и перспективных источников способно оказывать влияние непосредственно на БИС через сигналы, наведенные на выводы приборов. В этих условиях методология определения стойкости БИС к воздействию ЭМИ должна включать в себя два показателя, характеризующих стойкость к воздействию полей ЭМИ и стойкость к наводимым импульсным напряжениям.

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. 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.
3. Барбашов В. М., Трушкин Н. С. Функционально-логическое моделирование качества функционирования ИС при воздействии радиационных излучений // Микроэлектроника. 2009. Т. 38. № 1. С. 34–47.
4. Аствацатурьян Е. Р., Барбашов В. М., Беляев В. А., Приходько П. С. Функционально-логическое моделирование радиационных отказов БИС // Специальная радиоэлектроника. 1993. Вып. 7–9. С. 15–19.

