



ПОРТФЕЛЬ РЕДАКЦИИ

БИТ

В. М. Барбаиов (к. т. н., доцент), Н. С. Трушкин (к. т. н., доцент)
Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОПРОГРАММНЫХ БИС В УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СБОЕВ

В статье рассматриваются методы функционально-логического прогнозирования безопасности функционирования микропрограммных БИС, основанные на модели нечеткого цифрового автомата Брауэра. Приводятся рекомендации по методам прогнозирования остаточных радиационных эффектов в микропрограммных БИС. В качестве примера приведены теоретические и экспериментальные результаты показателей надежности ЭУ при реализации угроз безопасности их функционирования в виде остаточных повреждений микроструктуры ИС.

Существенное влияние на поведение БИС при воздействии излучения различной природы оказывают их особенности схемотехнической, функционально-логической и структурной реализации, которые весьма сложно учесть только в базисе моделей электрического уровня. В первую очередь это касается БИС микропрограммного типа, для которых функциональная безопасность работоспособности доминирует над параметрической. При этом большое число разнообразных видов функциональных отказов наряду с практически неограниченным числом реализуемых БИС функций приводит к малой информативности традиционных усредненных подходов их описания.

Модель конечного автомата микропрограммных устройств (МПУ) традиционно строится в виде композиции операционного и управляющего автоматов [1]. Это позволяет реализовать автомат Брауэра (АБ) схемного типа для МПУ в виде комбинации операционного автомата (ОАБ) типа МУРА или управляющего автомата (УАБ) типа МИЛИ:

$$\begin{aligned}\vec{Y}_{q_{n_1}}^{n_1} &= f_{BOA1}(\vec{x}_q^{n_1}, \vec{x}_0^{n_1}, \vec{Q}_{OA}^{n_1-1}, \vec{M}_1^{n_1}), \\ \vec{Y}_V^{n_1} &= f_{BOA2}(\vec{x}_q^{n_1}, \vec{x}_0^{n_1}, \vec{Q}_{OA}^{n_1-1}, \vec{M}_1^{n_1}), \\ \vec{Q}_{OA}^{n_1} &= f_{POA}(\vec{x}_q^{n_1}, \vec{x}_0^{n_1}, \vec{Q}_{OA}^{n_1-1}, \vec{M}_1^{n_1}, \vec{M}_2^{n_1}), \\ \vec{Y}_q^{n_2} &= f_{BVA}(\vec{Q}_{VA}^{n_2}, \vec{M}_3^{n_2}), \\ \vec{Q}_{VA}^{n_2} &= f_{PIVA}(\vec{x}_k^{n_2}, \vec{x}_V^{n_2}, \vec{Q}_{VA}^{n_2-1}),\end{aligned}$$

где $\vec{x}_q, \vec{x}_k, \vec{x}_0, \vec{x}_V, \vec{Y}_q$ — множество двоичных факторов входных данных и команд МПУ, микроопераций, условий и выходных данных МПУ соответственно; $\vec{Q}_{OA}, \vec{Q}_{VA}$ — множество двоичных векторов состояний ОАБ и УАБ соответственно; $f_{BOA1}, f_{BOA2}, f_{BVA}, f_{POA}, f_{PIVA}$ — функции выхода и перехода ОАБ и УАБ соответственно; $\vec{M}_i^{n_j}$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2$) — векторы критериальной функции

принадлежности (КФП), определяющие качество функционирования модулей МПУ в условиях воздействия факторов; n_j — номера тактов автоматного времени ($n_1 \geq n_2$), принадлежащих единому циклу выполнения микрооперации.

Требование обеспечения безопасности функционирования МПУ при воздействии ионизирующего излучения (ИИ) или одиночных импульсов напряжения (ОИН) подразумевает соответствие результатов функционирования при заданных уровнях воздействия, структуре входных данных и алгоритме работы булевому эталонному результату ($U_{ИИ} = 0$ В). И поэтому безопасность функционирования применительно к воздействию ИИ в общем случае характеризуется несколькими показателями $U_{ИИ}$, при которых наблюдается нарушение его работоспособности по несоответствию входных данных (оценка по f_{BOA1}), микроопераций f_{BVA} и условий перехода микропрограммы f_{BOA2} .

Для получения упрощенных оценок работоспособности МПУ при воздействии ИИ или ОИН необходимо перейти к рассмотрению некоторых выборочных состояний объекта. В качестве последних можно привести технические состояния элементов памяти МПУ, соответствующие минимальной Q_{\min} и максимальной Q_{\max} чувствительности характеристик этих элементов при воздействии ИИ. Из трех типов базовых переменных модели алгоритмического уровня (данные, логические условия, операции) информацию о конкретных особенностях реализуемого алгоритма при неизвестной структуре входных данных сохраняют только операции. Однако при оценке их КФП необходимо учитывать функции принадлежности всех трех типов, поскольку отказ объекта на функционально-логическом уровне в равной степени идентифицируется по выходу из переменных $\vec{Y}_q, \vec{Y}_y, \vec{Y}_0$ [2].

Параметрами АБ схемного типа, которые можно использовать в качестве КФП микроопераций, могут быть функции работоспособности (ФР), инвариантные структуре входных данных ОА:

$$\Psi_j(U) = \max_k \Psi_j(\vec{x}_k, U).$$

Для построения обобщенной модели МПУ алгоритмического типа его удобно представить структурной моделью в виде ориентированного графа, вершинам которого соответствуют функционально-законченные фрагменты устройства (модули), осуществляющие хранение, обработку и передачу информации с ветвями, которым ставятся в соответствие возможные пути передачи информации между модулями и определенные микрокоманды.

Каждому j -му модулю структурной модели МПУ поставим в соответствие три ФР — $\Psi_{ij}(U, \vec{x}_k), i = 1, 2, 3$ определяющие техническое состояние S_{Tj} этого фрагмента при данном U . Нечеткость S_{Tj} при выполнении q -й микрооперации, соответствующей фиксированным $\vec{x}_1 \subset \{\vec{x}_k\}$ и $\vec{Q}_{jB} = \{Q_{\max}, Q_{\min}\}$, будет определяться максимальной из них:

$$\Psi_{jB}^q(U, \vec{x}_q, \vec{Q}_{jB}) = \max_i \Psi_{ij}(U, \vec{x}_q, \vec{Q}_{jB}).$$

В свою очередь, в качестве оценки нечеткости выполнения q -й микрооперации примем максимальную ФР ($\Psi_{jB}^q(U, \vec{x}_q, \vec{Q}_{jB})$) технических состояний всех модулей МПУ, обеспечивающих ее реализацию:

$$\Psi_B^q(U) = \max_{j \in n_q} \Psi_{jB}^q(U, \vec{x}_q, \vec{Q}_{jB}),$$

где n_q — множество номеров модулей, активизированных в q -й микрооперации.

Равенство Ψ_B^q нулю соответствует, безусловно, правильному выполнению микрооперации при заданном U . Поскольку в рассматриваемой обобщенной модели качества функционирования логических условий учитываются в Ψ_B^q , а любой алгоритм может быть формально преобразован к линейной последовательности микроопераций [1], то поведение МПУ при воздействии ИИ или ОИН может быть оценено по наихудшей $\Psi_B^q(U)$ ($q = 1, 2, \dots$), входящей в микропрограмму. Тогда пороговый уровень воздействия, начиная с которого возможны нарушения работоспособности МПУ хотя бы в одном из функциональных режимов, можно определить из условия:



$$U_n = \inf_U \left\{ U \mid \max_{q \in n_a} \Psi_{\max}^q(U) > 0,5 \right\},$$

где n_a — множество операций алгоритма.

Диапазон неоднозначности ΔU_n , где возможны эффекты типа «целевых» функциональных отказов, определяется как:

$$\Delta U_n = [U_n, U_n],$$

$$\text{где } U_n = \sup_U \left\{ U \mid \max_{q \in n_a} \Psi_{\min}^q(U) > 0,5 \right\}.$$

В рамках обобщенной модели МПУ алгоритмического типа качества функционирования был реализован автомат Брауэра схемного типа и предложен алгоритм построения структурной модели в виде ориентированного графа с ветвями, которым ставятся в соответствие пути передачи информации между модулями и соответствующие микрокоманды. В табл. 1 в качестве примера приведены расчетные зависимости ФР наиболее критичных путей передачи информации в ТТЛШ БИС ПЗУ K1656PE4 в условиях возникновения долговременных изменений статических параметров, обусловленных эффектами смещения. Метод построения КФП приведен в литературе [2].

Таблица 1. Результаты расчета отдельных информационных путей ТТЛШ БИС ПЗУ K1656PE4

№ пути	Структурная схема информационного пути ПЗУ	Входные логические состояния	Функция работоспособности, Ψ	Графический вид, Ψ
1		0 1	$\Psi = \bar{\mu}_4^6 + \mu_{12}^6$ $\Psi = \mu_4^6 + \bar{\mu}_{12}^6$	
2		0 1	$\Psi = \mu_1^7 \bar{\mu}_3^6 +$ $+ \mu_3^6 \bar{\mu}_3^6 +$ $+ \mu_{12}^6$ $\Psi = \mu_3^6 \bar{\mu}_{12}^6$	

С целью проверки предложенной модели и алгоритма расчета был проведен цикл экспериментов по определению информационной безопасности в виде порога параметрического и функционального отказов БИС K1656PE4. На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости $I_{\text{вх}}^0$ от флюенса нейтронов.

Представленные в работе результаты можно сформулировать следующим образом:

Предложен метод построения структурной модели МПУ в виде ориентированного графа с ветвями, которым ставятся в соответствие пути передачи информации между модулями и микрокоманды.

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

Полученные теоретические результаты позволяют обоснованно определять допустимые границы области эксплуатации МПУ в каждом конкретном случае.

Проведены экспериментальные исследования БИС ПЗУ К1656РЕ4, которые подтвердили расчетные результаты. Наличие зависимости стойкости ПЗУ от входных микрокоманд совпадает с полученными экспериментальными результатами. Так, БИС ПЗУ в режиме хранения имеет большую чувствительности к облучению, чем в режиме считывания.

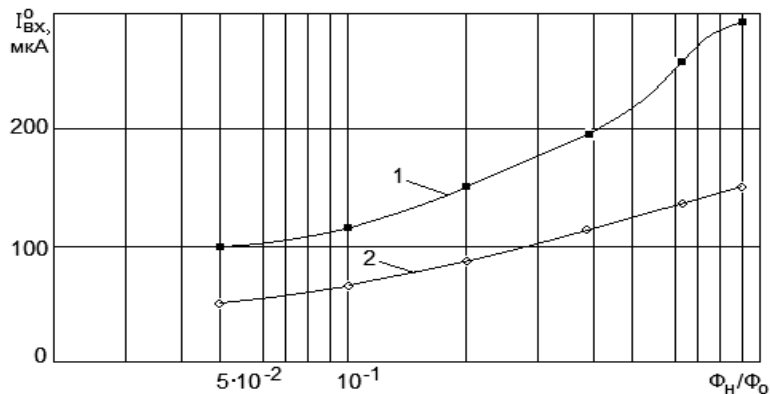


Рис. 1. Экспериментальные зависимости $I_{вх}^0$ от флюенса нейтронов ТТЛШ БИС ПЗУ К1656РЕ4 при облучении в пассивном (1) и активном (2) режимах работы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков В. М. Теория автоматов и формальные преобразования микропрограмм // Кибернетика. 1965. № 5. С. 1–9.
2. 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.

