

## Электронные системы

УДК 621

Д.Х. Григорян, Н.В. Меликян, А.Г. Степанян

### Анализ особенностей радиационного поведения цифровых устройств методом скалярных индексов сравнения в рамках модели автомата Брауэра

Рассматривается новый класс параметров логических моделей радиационного поведения цифровых интегральных схем (ИС), отражающих характер нарушения их работоспособности при облучении и относительный вклад в него отдельных элементов, входящих в состав анализируемого объекта.

**A new class of parameter-ditch logical models of radiation in digital integrated circuits (ICs), reflecting the nature of the work-ability violation by irradiation and the relative contribution of the individual elements that make up the test object.**

#### Введение

В настоящее время представляется весьма актуальным проектирование ИС, устойчивых к воздействию радиации. Одним из перспективных направлений является многоуровневое смешанное моделирование, позволяющее использовать модели с разнообразной математической структурой и оперирующие переменными с различной физической природой [1].

Основным недостатком существующих подходов к реализации многоуровневого смешанного моделирования является замкнутость логических моделей относительно схемотехнических, что затрудняет явное представление зависимости воздействия радиационно-чувствительных параметров ИС.

В работе [2] предлагается новый класс логических моделей цифровых схем, основанных на автоматах Брауэра (АБ) с использованием нечеткой логики [3]. Эти модели сочетают в себе основные преимущества традиционных логических моделей и позволяют задавать в них радиационное поведение цифровых элементов.

В настоящей работе предлагается использовать обобщенные показатели логических моделей радиационного поведения цифровых ИС типа АБ, отражающие характер нарушения их работоспособности при облучении и относительный вклад в него отдельных элементов, входящих в состав анализируемого объекта.

#### Индексы сравнения

Логическая функция ациклической комбинационной схемы имеет каноническое дизъюнктивное разложение. Функцию  $f_i$  в этом случае следует интерпретировать как функцию принадлежности нечеткого подмножества  $U_p$  универсального множества  $U$  значений уровней внешнего воздействия:

$$f_i(x_1, \dots, x_n, t) = \Psi_{i0} \Pi_0 \vee \Psi_{i1} \Pi_1 \vee \dots \vee \Psi_{ir-1} \Pi_{r-1}, \quad (1)$$

где  $i$  ( $0 \leq i < m$ ) – число выходов АБ<sub>s</sub>;  $t$  ( $0 \leq t < r$ ) – автоматное время;  $r$  – число интервалов времени;

$$\Psi_{ij} = \bigvee_{\mu_1^{ij}, \dots, \mu_n^{ij}} x_1(\mu_1^{ij}) \dots x_n(\mu_n^{ij}) \cdot \lambda(\mu_1^{ij}, \dots, \mu_n^{ij}),$$

$$\Pi_j = \begin{cases} 1, & t = j, \\ 0, & t \neq j, \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_s^{ij} \in \{0, 1\}; \quad s \in \{0, 1, \dots, n-1\},$$

$$x_s(\mu_s^{ij}) = \begin{cases} x_s, & \mu_s^{ij} = 1, \\ \bar{x}_s, & \mu_s^{ij} = 0, \end{cases}$$

$$\lambda(\mu_1^{ij}, \dots, \mu_n^{ij}) \in \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$$

Функция принадлежности характеризует степень удовлетворения статических или динамических критериальных параметров электрического уровня описания выбранному разработчиком критериальному отношению. В качестве показателя, характеризующего работоспособность объекта при облучении, можно выбрать некоторое отношение на множестве  $U$ , устанавливающее соответствие результатов функционирования устройства (описываемы функциями  $f_i$ ) при заданных предыстории облучения, структуре входных данных и режимах работы некоторой эталонной функции. В качестве эталонной выбирается функция  $f_i$  цифровой ИС при нулевом уровне воздействия, либо цифровой ИС, работающей в аналогичных условиях и аналогичной по функциональному назначению, но отличающейся способом реализации. В качестве отношений, позволяющих сравнивать различные

подмножества некоторого универсального множества, используются различные модификации скалярных индексов сравнения (СИС) [4].

Отношения, характеризующие функционирование цифровых ИС в условиях воздействия радиационных факторов, следующие.

– Функция работоспособности (ФР) цифровой ИС:

$$\phi_j(U) = D(f_j(U), f_j(0)), \quad (3)$$

где  $D$  – функция нечеткой симметрической разности

$$D(a, b) = \max[\min(a, \bar{b}), \min(\bar{a}, b)]$$

$\phi_j$  и  $\phi'_j$  – ФР цифровой ИС при ее реализациях  $f_j$  и  $f'_j$ .

ФР определяется при условии выбора в качестве эталона самой выходной функции  $f_i$  в отсутствие облучения. При этом граничные значения ФР равны

$$\phi_j(U) = \begin{cases} 0, & \text{если объект неработоспособен,} \\ 1, & \text{если объект работоспособен.} \end{cases}$$

Для получения зависимости качества функционирования цифровой ИС при облучении от структуры входных и выходных данных, режима работы, а также радиационных параметров базовых элементов рассматриваются частные функции работоспособности:

– ФР по  $j$ -му выходу при  $k$ -ом входном наборе сигналов:

$$\phi_j(\bar{x}_k, U) = D(f_j(\bar{x}_k, U), f_j(\bar{x}_k, 0)); \quad (4)$$

– ФР по  $j$ -му выходу инвариантно входным наборам:

$$\phi_j(U) = \max_k \phi_j(\bar{x}_k, U); \quad (5)$$

– ФР по  $k$ -ом входному набору инвариантно выходным наборам:

$$\phi_j(\bar{x}_k, U) = \max_j \phi_j(\bar{x}_k, U); \quad (6)$$

– обобщенная ФР:

$$\phi(U) = \max_j \phi_j(U) = \max_k \phi(\bar{x}_k, U). \quad (7)$$

Чувствительность функции работоспособности  $\phi_j$  к варьированию функции выхода  $f_i$  (при условии сохранения эталонной булевой функции цифровой ИС с нулевым уровнем воздействия), входных наборов переменных  $\bar{x}$  и параметров элементов, определяющих критериальную функцию принадлежности (КФП)  $\bar{\lambda}$ , определяется через относительное приращение ФР, связанное с изменением этих величин. Функция

чувствительности (ФЧ), эквивалентная производной от  $\phi_j$  по  $a_{ir}$ , изменяется в интервале 0,1, причем ее граничные значения характеризуют, соответственно, полную нечувствительность ФР к варьированию  $a_{ir}$  при заданном  $U$  и доминирующее влияние  $a_{ir}$  на изменение  $\phi_j$ :

$$\Delta_j(a_{ir}, U) = \frac{D_1(\phi_j((a_{ir}^1, \bar{a}_i), U), \phi'_j((a_{ir}^0, \bar{a}_i), U))}{D_1(a_{ir}^1, a_{ir}^0)} \quad (8)$$

где  $\bar{a}_i(a_{i1}, \dots, a_{in})$  – векторный параметр или переменная

$$a_{ir} : (a_{ir}^\delta, \bar{a}_i) = (a_{ir}, \dots, a_{ir-1}, a_{ir}^\delta, a_{ir+1}, \dots, a_{in});$$

$$\delta \in \{0, 1\},$$

$$D_1(a, b) = |a - b|.$$

На практике в зависимости от специфики конкретной задачи оказываются полезными различные модификации ФЧ:

– дифференциальная функция важности (ДФВ):

$$\Delta_{jB}(\lambda_{ir}, U) = \lim_{U^1 \rightarrow U^0} \frac{D_1[\phi_j(\lambda_{ir}(U^1), \bar{\lambda}_i(U^1)), \phi_j(\lambda_{ir}(U^0), \bar{\lambda}_i(U^0))]}{H_1(\lambda_{ir}(U^1), \lambda_{ir}(U^0))} \quad (9)$$

где  $U^1 > U^0$ ;

– информационная функция чувствительности первого порядка (ИФЧ1):

$$\delta_{jii}(x_{ir}, \phi) = D_1(\phi_j((x_{ir}^1, \bar{x}_i), U), \phi_j((x_{ir}^0, \bar{x}_i), U)) \quad (10)$$

где  $x_{ir}^1 = 1, x_{ir}^0 = 0, \bar{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$ ;

– функция предпочтения (ФП):

$$\Delta_{jP}(\bar{x}_i, U) = D_1[\phi_j(\bar{\lambda}_k, U), \phi'_j(\bar{\lambda}_q, U)], \quad (11)$$

$$\bar{\lambda}_k \neq \bar{\lambda}_q$$

– функции несовпадения (ФН):

$$\Delta^1_{jD}(\bar{x}_i, U) = \min[\phi^1_j(\bar{\lambda}_k, U), 1 - \phi^2_j(\bar{\lambda}_q, U)], \quad (12)$$

$$\Delta^2_{jD}(\bar{x}_i, U) = \min[\phi^2_j(\bar{\lambda}_q, U), 1 - \phi^1_j(\bar{\lambda}_k, U)]. \quad (13)$$

ДФВ принимает два дискретных значения:

$$\Delta_{jB}(\lambda_{ir}, U) = \begin{cases} 0, & \text{если элемент с } \lambda_{ir} \\ & \text{не доминирует при заданном } U \\ 1, & \text{если элемент с } \lambda_{ir} \\ & \text{доминирует при заданном } U \end{cases}$$

Очевидно, что  $\Delta_{jB}(\lambda_{ir}, U) = \max \Delta_{jB}(\lambda_{ir}, U)$ .

Диапазон воздействий  $\Delta U_r$ , в котором элемент с КФП  $\lambda_{ir}$  является доминирующим, т.е. обуславливающим отказ цифровой ИС в данном логическом состоянии при входном наборе сигналов  $\bar{x}_k = \bar{x}_{k0}$ , определяется из соотношения:

$$\Delta U_r = \left\{ U \mid \Delta_{jB}(\lambda_{ir}, U) > \varepsilon \right\},$$

а элементы цифровой ИС, обуславливающие нижнюю границу значений уровня внешнего воздействия, при которых проявляется его отказ в данном состоянии, определяются из условия

$$r^* : \Delta_{jB}(\lambda_{ir^*}, U_{r^*}) > 0,$$

где  $r^*$  – номер КФП, описывающей радиационное поведение указанных элементов:

$$U_{r^*} = \inf_r (\Delta U_r).$$

Критический элемент, т.е. элемент цифровой ИС, имеющий наихудшие радиационные характеристики, может быть найден из соотношений (9) и (13) при замене  $\Delta_{jB}(\lambda_{ir}, U)$  на  $\Delta_B(\lambda_{ir}, U)$ .

Сложный характер радиационного поведения цифровой ИС обуславливает необходимость разработки специальных методик синтеза контролирующих и диагностирующих последовательностей для проведения их испытаний [7]. Для структурно-неоднородных объектов, содержащих элементы с различной радиационной чувствительностью, на каждом интервале значений уровней внешних воздействий требуются свои последовательности входных сигналов, выявляющие наличие доминирующих элементов (определяющих радиационное поведение объекта в данном интервале) и неисправных состояний на выходе цифровой ИС. Множество наборов входных сигналов  $\{\bar{x}_j\}$  является информационным тестом  $X_{jm}$  для  $j$ -го выхода цифровой ИС, если замена любого  $\bar{x}_k$  на любое  $\bar{x}_q$  приводит при заданном  $U_k$  к изменению ФР устройства. Для построения  $X_{jm}$  можно воспользоваться общим определением ФЧ (8), если в качестве  $a_{ir}$  выбрать для данного  $\bar{x}_i$  его  $r$ -ю координату  $X_{ir}$  и положить  $\phi_j = \phi'_j$ . Тогда функция  $\Delta_j(x_{ir}, U)$  будет характеризовать чувствительность радиационного поведения цифровой ИС к варьированию входной информации, преобразуемой им по  $j$ -му выходу, в связи с чем ее будем называть информационной функцией

чувствительности первого порядка (10). ИФЧ1 принимает значения на интервале  $[0, 1]$ , граничные значения которого интерпретируются как

$$\delta_{j1u}(x_{ir}, U) = \begin{cases} 0, & \text{характер поведения объекта} \\ & \text{при варьировании } x_{ir} \\ & \text{не изменяется;} \\ 1, & \text{изменение характера поведения} \\ & \text{объекта при варьировании } x_{ir} \\ & \text{максимально.} \end{cases}$$

С целью обеспечения эффективной процедуры контроля работоспособности цифровой ИС необходимо минимизировать мощность множества  $X_{jm}$ , оставляя только те входные наборы, значения  $\delta_{j1u}$  которых превышают некоторый порог достоверности контроля. В качестве такого порога, исходя из способа построения КФП и ФР, удобно принять уровень 0,5 [4].

Для синтеза  $X_{j\min}$  необходимо локализовать диапазон  $\Delta U_{ij}$ , в пределах которого возможен контроль цифровой ИС на базе входного набора  $\bar{x}_i$ :

$$\Delta U_{ij} = \bigcup_{r=1}^n U_{jir} = \bigcup_{r=1}^n \left\{ U \mid \delta_{jir}(x_{ir}, U) \geq 0,5 \right\}.$$

В случае  $\Delta U_{ij}$  покрывает интересующий разработчика диапазон  $\Delta U$ , в пределах которого требуется проанализировать работоспособность цифровой ИС ( $\Delta U_{ij} \subset \Delta U$ ), то искомым тест определяется как

$$X_{j\min} = \bigcup_{r=1}^n \left\{ (x_{ir}^\delta, x_i) \mid \delta_{jir}(x_{ir}, U) \geq 0,5 \right\},$$

где  $\delta \in \{0, 1\}$

При  $\frac{\Delta U}{\Delta U_{ji}} \neq 0$  дальнейшее пополнение

$X_{jm}$  осуществляется аналогично, либо с использованием других базовых наборов, удаленных от  $\bar{x}_i$  на большее единицы расстояние Хэмминга, либо введением ИФЧ более высоких порядков, получаемых из (9) заменой  $(x_{ir}^\delta, \bar{x}_i)$  на  $(x_{ir1}^{\delta_{r1}}, x_{ir2}^{\delta_{r2}}, \dots, x_{irk}^{\delta_{rk}}, \bar{x}_i)$ , где  $\delta_{r1}, \dots, \delta_{rk} \in \{0, 1\}$  и  $k < n - 1$ .

Использование при анализе цифровой ИС показателей типа ФР, ДФВ и ИФЧ позволяет выявить наиболее неустойчивые к облучению базовые элементы схемы и уязвимые режимы работы и, следовательно, выбирать наиболее подходящие методы обеспечения стойкости с уче-

том реальной специфики радиационного поведения объекта. Существенным достоинством описанного аппарата является возможность оценки эффективности не только структурных, но и конструктивно-технологических и схемотехнических методов повышения радиационной стойкости, не выходя за рамки моделей функционально-логического уровня описания. Поэтому для обеспечения стойкости цифровой ИС на стадии его разработки необходимо располагать специальной группой показателей, именуемых функциями предпочтения и несовпадения, позволяющих сравнивать между собой по стойкости разные варианты реализации объекта.

Для повышения стойкости цифровых ИС при использовании конструктивно-технологических и схемотехнических методов, связанных с улучшением характеристики базовых элементов, варьированием погрузки, питания и т.д., в выражении (8) формульная запись функций  $\phi$  и  $\phi'$  совпадает, при этом отличия в ФР могут быть вызваны изменением значений сразу нескольких координат  $\lambda_j$ . Реализация структурных методов повышения стойкости изменяет вид не только  $\lambda_j$ , но и ФР, оставляя неизменным булевый эталон объекта. Для оценки эффективности используемых методов обеспечения стойкости можно использовать ФП вида (11).

Функция  $\Delta_{jB}$  характеризует влияние использования методов повышения стойкости на работоспособность устройства, принимая следующие граничные значения:

$$\Delta_{jB} = \begin{cases} 0, & \text{если работоспособность объекта} \\ & \text{не изменилась,} \\ 1, & \text{если } \phi = 1, \phi' = 0 \text{ или } \phi = 0, \phi' = 1 \end{cases}$$

Значения  $U$ , при которых  $\Delta_{jB}$  превышает определенный уровень достоверности оценки ( $\varepsilon > 0$ ), устанавливаемый дисперсией технологического разброса параметров базовых элементов, принадлежат интервалам уровней внешнего воздействия  $\Delta U_B$ , на которых один из вариантов реализации устройства предпочти

тельнее другого:

$$\Delta U_B = \{U | \Delta_{jB}(\vec{x}_j, U) > \varepsilon\}.$$

В силу симметричности определения (10)  $\Delta_{jB}$  не позволяет выяснить, приводит ли предлагаемый вариант реализации объекта к улучшению или ухудшению его стойкости. Поэтому его необходимо дополнить показателями, не удовлетворяющими условию симметричности, в качестве которых удобно использовать функции несовпадения (12), (13).

Функции несовпадения  $\Delta_{jD}^1$  и  $\Delta_{jD}^2$  показывают, обеспечивает ли замена базовых элементов, режимов их работы или структурной организации объекта улучшение ( $\Delta_{jD}^1 > \Delta_{jD}^2$ ) или ухудшение ( $\Delta_{jD}^1 < \Delta_{jD}^2$ ) показателей радиационной стойкости устройства в целом.

## Выводы

Таким образом, описанный аппарат отражает относительный вклад отдельных элементов радиационного воздействия на поведение цифровых ИС.

## Литература

1. Saleh R.A., Newton A.R. Mixed-mode Simulation. - Kluwer Academic Publisher, 1990. - 248p.
2. Меликян В.Ш., Григорян Д.Х., Степанян А.Г., Меликян Н.В. Нечеткий автомат Браузера Комбинационных цифровых устройств со статическими и динамическими критериальными параметрами // Вестник государственного инженерного университета Армении. Серия моделирование, оптимизация и управление. - Ереван, 2009. - Выпуск 12, том 2. - С. 59-65.
3. Timothy J. R. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 2nd edition. - Wiley, 2004. - 114 p.
4. Аствацатурян Е.Р., Беляев В.А., Гурарий А.Л., Колонтай И.В. Логическое моделирование процессов релаксации в цифровых устройствах // Электронные устройства предварительной обработки данных / Под ред. Т.М. Агаханяна. М.: Энергоатомиздат, 1990. - С. 58-65.