

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 оперирующее 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_s; 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

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

ϕ_j и ϕ'_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 ϕ_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 ϕ_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 ϕ_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):

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

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

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 ΔU_r , в котором элемент с КФП λ_{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

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

С целью обеспечения эффективной процедуры контроля работоспособности цифровой ИС необходимо минимизировать мощность множества X_{jm} , оставляя только те входные наборы, значения δ_{jju} 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_{jmin} необходимо локализовать диапазон ΔU_{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 ΔU_{ij} покрывает интересующий разработчика диапазон ΔU , в пределах которого требуется проанализировать работоспособность цифровой ИС ($\Delta U_{ij} \subset \Delta U$), то искомым тест определяется как

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

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 нагрузки, питания и т.д., в выражении (8) формульная запись функций ϕ и ϕ' совпадает, при этом отличия в ФР могут быть вызваны изменением значений сразу нескольких координат λ_j . Реализация структурных методов повышения стойкости изменяет вид не только λ_j , но и ФР, оставляя неизменным булевый эталон объекта. Для оценки эффективности используемых методов обеспечения стойкости можно использовать ФП вида (11).

Функция Δ_{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 Δ_{jB} превышает определенный уровень достоверности оценки ($\varepsilon > 0$), устанавливаемый дисперсией технологического разброса параметров базовых элементов, принадлежат интервалам уровней внешнего воздействия ΔU_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) Δ_{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 Δ_{jD}^1 и Δ_{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.