

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ СБОЕВ В ТИПОВЫХ ФРАГМЕНТАХ ЦИФРОВЫХ СТРУКТУР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В.Н. Устюжанинов

Рассматриваются условия появления логических отказов и сбоев в типовых фрагментах регулярных цифровых структур при воздействии тяжелых заряженных частиц космического пространства. Приводится классификация и вероятностные оценки сбоев, анализируются схемотехнические методы повышения стойкости по одиночным сбоям.

Ключевые слова: одиночные сбой, тяжелые заряженные частицы, стойкость по одиночным сбоям цифровой аппаратуры.

Воздействие тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства на электронные средства космических аппаратов (КА) может сопровождаться отказами в виде одиночных сбоев цифровых устройств. Для получения вероятностных оценок стойкости цифровых БИС применяют критерий частоты сбоев, определяемый с использованием параметра  $\sigma(E, L)$  - сечения одиночных эффектов [1]. Зависимость этого параметра от энергии  $E$  и линейной передачи энергии  $L$  ТЗЧ затрудняет определение его численного значения в конкретных условиях. Анализ показывает, что высокая степень неопределенности при выборе значений этого параметра может понизить уровень достоверности расчетных оценок до критической величины. Экспериментальные оценки сечений одиночных эффектов получают преимущественно путем косвенных измерений в частных случаях.

Отмеченные особенности обуславливают необходимость исследования возможностей разработки расчетных методов для определения сечений одиночных сбоев. Очевидными факторами и параметрами, влияющими на интенсивность процессов развития сбойных отказов в регулярных цифровых структурах, являются:

- частота и скважность информационных сигналов, т.е. частота переключения логических элементов (ЛЭ) и соотношение длительностей логических состояний;
- топологические характеристики транзисторов в составе ЛЭ – толщина чувствительного слоя микросхемы и размеры транзисторной структуры, определяющие величину ионизационного заряда;
- энергия и атомный номер налетающей заряженной частицы, определяющие пробег и линейные потери энергии в структуре полупроводника;
- время жизни  $\tau$  неосновных неравновесных носителей заряда (НН), индуцированных ТЗЧ;
- коэффициенты диффузии носителей заряда  $D$  в полупроводнике;
- пространственно-угловое распределение потока ТЗЧ.

Разработка расчетных моделей для сечений одиночных эффектов сводится к определению функциональных зависимостей между перечисленными параметрами, позволяющими установить их количественные характеристики, достаточные для формирования сбойных отказов.

Особенностями рассматриваемой проблемной области является множество различных состояний логических (цифровых) структур, возрастающее по закону геометрической прогрессии по мере увеличения размерности массива ЛЭ в их составе, и различные вероятности появления ложных сигналов (ЛС) на выходах для различных состояний. При этом число состояний, продуцирующих формирование ЛС, т.е. одиночных эффектов в виде отказа сбойного характера, всегда меньше общего числа возможных различных состояний. Такая особенность является следствием существования латентных отказов на уровне отдельных ЛЭ в составе структуры, не вызывающих появления ЛС на информационных выходах.

Практически значимым следствием рассматриваемых особенностей является неправомерность использования пропорциональных зависимостей между частотой отказов и числом ЛЭ для цифровых структур, как это предлагается в расчетных соотношениях [1]. Другое важное следствие связано с формальным определением сечения одиночных эффектов, как отношения числа ТЗЧ, вызвавших эффект, к общему числу частиц, воздействующих на объект на определенном временном интервале. Поскольку при неизменных характеристиках потока ТЗЧ на этом интервале происходит перебор логических состояний, пропорциональный частоте следования информационных сигналов, то формальное определение сечения отказа имеет и другую интерпретацию – отношение числа различных состояний цифровой структуры, «опасных» для развития одиночных эффектов, к общему числу состояний. С учетом этого задача получения расчетных оценок сечения отказов для фрагментов цифровых структур различной сложности сводится к определению методами комбинаторного анализа числа «опасных» состояний, т.е. численной оценке эффекта латентности для каждого вида объектов, от ЛЭ до матриц памяти.

Условия формирования одиночных эффектов от воздействия ТЗЧ можно рассмотреть на уровне элементарного функционального преобразователя – логического элемента на биполярных транзисторах в составе цифровой микросхемы. Ионизационные эффекты действия ТЗЧ на чувствительные области микросхемы в виде зарядов и ионизационных токов могут проявляться только в виде перехода из состояния высокого потенциала на выходе (логическая единица) в состояние высокой проводимости

(логический ноль), т.е. ложного перехода ЛП10. Следовательно, на уровне отдельного ЛЭ можно выделить опасные наборы входных сигналов, обуславливающих единичное состояние информационного выхода, и наборы входных сигналов – состояния с нулевым значением выхода, не чувствительные к ионизационным эффектам действия ТЗЧ.

Отношение числа опасных состояний ЛЭ к числу возможных определяет вероятность одиночного сбойного эффекта в приближении равной вероятности формирования любого набора управляющих входных сигналов в момент воздействия ТЗЧ с энергией, превышающей пороговое значение. С учетом изложенного выше, такую вероятностную оценку можно интерпретировать как сечение одиночного эффекта в виде ложного нулевого сигнала на выходе для логического элемента при воздействии ТЗЧ.

Особенности функционирования ЛЭ разных типов отображаются в таблицах истинности, устанавливающих отношения между возможными наборами значений логических переменных (входных информационных сигналов) и значением соответствующей логической функции (выходного сигнала). Различия таблиц истинности обуславливают разные значения сечений одиночных эффектов. В Таблице 1 представлены значения опасных наборов и соответствующие им сечения формирования ложных сигналов ЛС10.

Таблица 1. Опасные наборы и сечения сбойных эффектов для различных логических элементов

Тип ЛЭ	ИЛИ	И	ИЛИ-НЕ	И-НЕ
$K_{оп1}$	$2^s - 1$	1	1	$2^s - 1$
$\sigma_{лэ}$	$(2^s - 1)/2^s$	$1/2^s$	$1/2^s$	$(2^s - 1)/2^s$

Символом  $s$  обозначено число внешних логических входов.

Анализ данных Табл. 1 позволяет сделать несколько практически важных выводов:

- логические элементы в составе разных логических базисов характеризуются двумя видами функциональных зависимостей сечений логических сбоев от числа входных информационных каналов. В рамках каждого базиса для разных типов ЛЭ численные значения сечений отличаются в  $(2^s - 1)$  раз, т.е. различие растет практически по степенной зависимости от числа входов ЛЭ;
- изменение соотношений между количеством ЛЭ одного или разных логических базисов в составе цифровой структуры, реализуемой, например, в виде БИС, при сохранении постоянным общего числа ЛЭ сопровождается изменением сечения одиночного эффекта и, соответственно частоты сбоев, по явно непропорциональному закону, как это принято в [1];
- известная закономерность в виде одно-многозначного соответствия между логической функцией и схемотехническими вариантами ее реализации с использованием разных наборов различных ЛЭ [2] с учетом данных Табл. 1 позволяет сделать вывод о существовании оптимального варианта цифровой структуры с минимальными значениями сечения одиночных сбоев и частоты отказов.

С учетом рассмотренных особенностей можно сформулировать одну из основных задач определения частоты отказов для цифровых структур при воздействии ТЗЧ, как задачу определения сечения одиночных сбоев по характеристикам структуры в виде числа ЛЭ разных видов и способов соединения их между собой.

Полученные оценки сечений одиночных сбоев для ЛЭ разных типов следует рассматривать как статические, т.е. не учитывающие динамику процессов обработки информации. В реальных условиях функционирования ЛЭ и цифровых структур смена комбинаций управляющих сигналов на входах логических элементов происходит с определенной частотой  $f_c$ , определяемой длительностями периодов единичного  $T_1$  и нулевого  $T_0$  состояний информационного сигнала  $f_c = 1/(T_1 + T_0)$ . В условиях равной вероятности любого момента действия ТЗЧ на временном интервале, равном периоду информационного сигнала, и равновероятного распределения любого набора из числа возможных комбинаций сигналов на входах ЛЭ формирование нулевого ложного состояния на выходе ЛЭ происходит с вероятностью

$$P_0 = t_0 / (T_0 + T_1) = t_0 f_c, \quad (1)$$

где  $t_0$  – длительность ионизационного эффекта действия ТЗЧ. С учетом (1) и данных Табл.1, динамическое сечение одиночных сбоев в логических элементах определяется как произведение вероятностей независимых событий и для различных ЛЭ может принимать два значения

$$\sigma_{длэ} = f_c t_0 \frac{2^s - 1}{2^s}; \quad \sigma_{илэ} = \frac{f_c t_0}{2^s}. \quad (2)$$

Введенные понятия статического и динамического сечения одиночного сбойного эффекта в виде формирования не алгоритмического нулевого состояния на выходах ЛЭ в составе цифровых структур при воздействии одиночной тяжелой частицы позволяют: учесть особенности структуры (состав и способ соединения логических элементов); оценить влияние частоты следования информационных

сигналов на сечение сбойных эффектов. Из Таблицы следует, что в любом логическом базисе содержатся ЛЭ с двумя разными значениями статического сечения. Это позволяет, руководствуясь положениями [1], определить частоту сбоев для цифровой структуры в виде

$$\nu = N_1 \sigma_{1длэ} + N_2 \delta_{2длэ}, \quad (3)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – число ЛЭ первого и второго типов в составе структуры. С учетом (1) и (2) оценка (3) принимает вид

$$\nu = f_c t_0 \left\{ N_1 \frac{2^s - 1}{2^s} + N_2 \frac{1}{2^s} \right\}. \quad (4)$$

Выражение (4) является обобщенной моделью частоты сбоев в цифровых структурах, не содержащих элементов памяти. Оно позволяет оценить влияние временных параметров информационных сигналов, а также размерность, состав и характеристики логической структуры на частоту сбойных эффектов. Однако параметры  $N_1$ ,  $N_2$  и  $s$  связаны между собой, что ограничивает возможности произвольного назначения их без риска получения ошибочных оценок частоты сбоев. Для получения достоверных оценок необходимо определить функциональную зависимость между этими параметрами.

Для этого необходимо учитывать, что любая цифровая структура является одним из вариантов технической реализации логической функции, определяющей закономерности функционирования соответствующего преобразователя информации. В свою очередь, любая логическая функция может быть представлена в виде универсальной функции, определяемой как совершенная дизъюнктивная нормальная форма (СДНФ) [2], т.е. логическая сумма ( $\vee$ ) логических произведений ( $\cdot$ ) переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$  вида:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = \vee_1^k (x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_r)_i, \quad (5)$$

где  $m$  – общее число входных переменных логической структуры,  $k$  – число скобочных фрагментов в составе логической функции в виде СДНФ,  $r$  – число переменных в составе скобочного фрагмента, объединенных операциями логического умножения (ранг операции конъюнкции). На примере СДНФ с параметрами:  $m=10, k=3, r=5$  обобщенную форму (5) можно представить в развернутом виде

$$f(x_1 \dots x_{10}) = x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_6 \cdot x_8 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_7 \cdot x_9 \vee x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 \cdot x_9 \cdot x_{10}. \quad (6)$$

Схемотехническая реализация каждого произведения осуществляется на ЛЭ «И» с числом входов  $2 \leq S \leq 5$ . Очевидно, что использование ЛЭ с разным числом входов требует различных затрат элементной базы для реализации соответствующих фрагментов логической функции. На рисунке представлены возможные варианты схемотехнических решений для первого произведения в (6). Из него следует, что возможны схемотехнические варианты, содержащие от одного до четырех ЛЭ, каждый из которых может являться причиной логического сбоя при воздействии ТЗЧ.

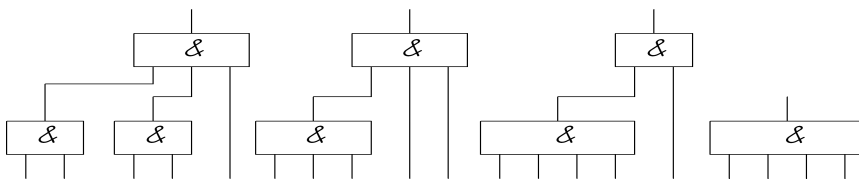


Рисунок. Варианты схемотехнической реализации пятиместной операции логического умножения на ЛЭ с разным числом входов.

Комбинаторный анализ показал, что затраты ЛЭ для реализации функции логического умножения – конъюнкции ранга  $r$  определяются по формуле

$$N_2 = \left\lceil \frac{r-1}{s-1} \right\rceil, \quad (7)$$

где  $\lceil \cdot \rceil$  – символ операции округления до ближайшего большего целого. С учетом (7) оценка (4) для СДНФ принимает вид

$$\nu = f_c t_0 \left\{ \left\lceil \frac{k-1}{s-1} \right\rceil \frac{2^s - 1}{2^s} + k \left\lceil \frac{r-1}{s-1} \right\rceil \frac{1}{2^s} \right\}. \quad (8)$$

Оценка (8) показывает что, при прочих равных условиях, при воздействии одной ТЗЧ число логических сбоев резко сокращается по мере увеличения числа входов  $s$  ЛЭ. Установленная закономерность

обуславливает возможность использования эффективных схемотехнических решений путем применения многовходовых ЛЭ в составе цифровой структуры для повышения стойкости по одиночным эффектам при воздействии ТЗЧ. Из (8) следует, что оптимальный вариант схемотехнической реализации с минимальной частотой сбоев соответствует условию  $r = s$ .

Приведенные результаты анализа позволяют сформулировать основные принципы синтеза цифровых структур с повышенной стойкостью по одиночным эффектам к действию ТЗЧ. При прочих равных условиях, преимуществом обладают варианты фрагментов с многовходовыми ЛЭ. Для структур повышенной размерности предпочтительны варианты однородных, т.е. состоящих из одинаковых фрагментов. В этом случае оптимизация в масштабах цифровой структуры обеспечивается оптимизацией типового фрагмента.

Эффективность вариантов технических решений для цифровых структур на основе ЛЭ с разными значениями числа информационных входов по критерию минимизации частоты сбоев может быть выражена количественной оценкой на основе модели (8). В общем виде уменьшение критериального параметра  $\nu$  при увеличении числа входов ЛЭ на  $c$  единиц отображается коэффициентом

$$K = \frac{\nu_s}{\nu_{s+c}} = \frac{(2^s - 1) \left[ \frac{k-1}{s-1} \left[ +k \right] \frac{r-1}{s-1} \right]}{(2^{s+c} - 1) \left[ \frac{k-1}{s+c-1} \left[ +k \right] \frac{r-1}{s+c-1} \right]} \quad (9)$$

При выборе в качестве базового варианта с  $s=2$  выражение (9) упрощается до вида

$$K = \frac{\nu_2}{\nu_{2+c}} = 2^c \frac{k(r+2) - 3}{(2^{2+c} - 1) \left[ \frac{k-1}{c+1} \left[ +k \right] \frac{r-1}{c+1} \right]} \quad (10)$$

В качестве примера в Таблице 2 представлены результаты расчета по (10) для структуры с параметрами:  $k=10$ ,  $r=5$ .

Таблица 2. Оценки сокращения частоты сбоев в цифровой структуре при увеличении на  $c$  числа входов логических элементов в ее составе.

$c$	1	2	3	4	5	6
$K$	2,43	4,12	5,2	7,34	8	8,24

Данные Табл. 2 показывают возможность снижения практически на порядок частоты сбоев в цифровых структурах при воздействии ТЗЧ при использовании схемотехнических решений на многовходовых логических элементах.

Приведенные результаты получены в приближении, когда одна частица с энергией, превышающей пороговое значение, может воздействовать на любой ЛЭ в составе цифровой структуры и вызывать одиночный эффект. Очевидно, что при воздействии потока ТЗЧ ситуация изменяется и расчетные модели требуют уточнения. Пусть площадь сечения базы биполярного транзистора в составе ЛЭ характеризуется значением  $S_B$ . При известной плотности потока ТЗЧ  $\phi$ , число частиц, попадающих на эту площадь в единицу времени, определяется произведением  $\phi S_B$ . В результате оценка (8) для частоты сбоев уточняется

$$\nu_c = \phi S_B t_0 f_c \left\{ p \frac{2^s - 1}{2^s} \left[ \frac{k-1}{s-1} \left[ + \frac{qk}{2^s} \right] \frac{r-1}{s-1} \right] \right\}, \quad (11)$$

где  $p$  и  $q$  – соответственно число разных ЛЭ, реализующих, например, логическую функцию в виде СДНФ, в составе цифровой структуры на кристалле.

Теоретическая модель (11) позволяет учесть влияние системного фактора – частоты следования информационных сигналов  $f_c$ , а также топологических характеристик, состава и схемотехнических особенностей реализации ЛЭ на частоту сбоев цифровых структур. В качестве комплексной оценки совершенства топологической структуры и электрофизических характеристик ее элементов следует рассматривать длительность  $t_0$  электрической реакции (времени потери работоспособности) ЛЭ на воздействие ТЗЧ. Минимизация длительности электрического отклика ЛЭ и ИМС на воздействие ТЗЧ является эффективной мерой уменьшения частоты отказов.

Установленные закономерности создают предпосылки для решения различных задач обеспечения стойкости аппаратуры к действию тяжелых заряженных частиц космического пространства. В случаях, когда цифровая аппаратура реализована на элементной базе в виде набора ИМС или БИС, расчет частоты

сбоев с некоторым завышением может выполняться по (4), приведенного, с учетом плотности потока ТЗЧ, к виду

$$v = \varphi S_B f_C t_0 \left\{ N_1 \frac{2^s - 1}{2^s} + N_2 \frac{1}{2^s} \right\}. \quad (12)$$

На стадии разработки аппаратных средств, предназначенных для реализации заданных логических функций, применение теоретической модели (11) позволит определить варианты проектных решений с минимальной, при прочих равных условиях, частотой одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ.

### *Литература*

1. РД 134-0139-2005 Методы оценки стойкости аппаратуры к воздействию заряженных частиц по одиночным сбоям и отказам.
2. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. Изд. 3-е, перераб. и доп., М., «Энергия», 1974. 368 с.
3. Устюжанинов В.Н., Чепиженко А.З. Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах. - М.: Радио и связь, 1989.

ВАНТ, Вып. 4, 2010 г. С 10 – 14.