A.I. Chumakov¹, V.M. Uzhegov², A.O. Akhmetov¹, D.V. Boychenko¹,
A.V. Yanenko¹, N.V. Ryasnoy³

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia, e-mail: aichum@spels.ru, ORCID iD 0000-0001-6270-2663;
e-mail: ahmet@spels.ru, ORCID iD 0000-0001-9305-0821;
e-mail: dvboy@spels.ru, ORCID iD 0000-0002-8382-4675; e-mail: avyan@spels.ru,
ORCID iD 0000-0003-2371-2978

² TSNIIMASH, Pionerskaya Str., 4, Korolev, 141070, Russia, e-mail: corp@tsniimash.ru

³ SSC «Progress» JSC, Zemetsa Str., 18 Samara, 443009, Russia, e-mail: mail@samspace.ru

Single Event Effects Rate Calculation with Different Models

Keywords: single event effects, SEE rate calculation, threshold LET and cross section.

The paper presents SEE rate calculation using different models. It is shown the most conservative estimate for rate prediction is thin layer model. A new approach to set IC's SEE requirements is suggested. It is based on operational reliability failure probability and SEE failure probability (harsh environment) comparison.

А.И.Чумаков¹, В.М. Ужegov², А.О. Ахметов¹, Д.В. Бойченко¹, А.В. Яненко¹,
Н.В. Рясной³

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шоссе, 31, г. Москва, 115409, Россия,
e-mail: aichum@spels.ru, ORCID iD 0000-0001-6270-2663;
e-mail: ahmet@spels.ru, ORCID iD 0000-0001-9305-0821;
e-mail: dvboy@spels.ru, ORCID iD 0000-0002-8382-4675;
e-mail: avyan@spels.ru, ORCID iD 0000-0003-2371-2978

² ФГУП ЦНИИМаши, ул. Пионерская, 4, г. Королев, 141070, Россия,
e-mail: corp@tsniimash.ru

³ АО «РКЦ «Прогресс», ул. Земеца, 18, г. Самара, 443009, Россия,
e-mail: mail@samspace.ru

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТОЙКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ

Ключевые слова: одиночные эффекты, показатели стойкости, параметры чувствительности.

В работе проводится оценка показателей стойкости интегральных схем (ИС) при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) с использованием различных расчетных подходов. Показано, что наиболее консервативные оценки получаются в приближении тонкой чувствительной области. Предлагается подход к заданию требований по стойкости ИС при воздействии ТЗЧ, который основан на сравнении вероятностей отказов ИС, связанных с надёжностью, и отказов, возникающих в ИС при воздействии ТЗЧ в наиболее жестких условиях эксплуатации.

Введение

В настоящее время общепринятым подходом при задании требований по стойкости ИС к воздействию ТЗЧ является ограничение на пороговые значения линейных по-

терь энергии (ЛПЭ), при которых отсутствуют эффекты отказов и/или сбоев [1, 2]. Как правило, требования задаются только к эффектам отказов, а по эффектам сбоев считается достаточным получение справочных данных по параметрам чувствительности (минимальный набор параметров чувствительности – значения сечения насыщения и пороговых ЛПЭ для возникновения одиночного радиационного эффекта (ОРЭ)).

Тем не менее при анализе стойкости ИС к воздействию ТЗЧ регулярно возникают следующие вопросы:

- в чем различие между показателями стойкости и параметрами чувствительности;
- можно ли задать требования в терминах параметров чувствительности;
- на какие изделия электронной техники необходимо задавать требования;
- должны ли эти требования быть унифицированными или применимы только к факторам космического пространства (КП);
- какие параметры чувствительной области (ЧО) использовать;
- существуют ли объективные оценки предельных уровней воздействий при испытаниях для подтверждения требований?

Ответам на эти вопросы и посвящена настоящая работа.

Параметры чувствительности и показатели стойкости

К минимальному набору параметров чувствительности относятся:

L_{zo} – пороговое значение ЛПЭ возникновения ОРЭ;

σ_{zs} – сечение насыщения ОРЭ.

Минимальный набор параметров необходим для оценки показателей чувствительности, к которым относятся ν – частота ОРЭ и/или P – вероятность отказа ИС вследствие возникновения ОРЭ. Однако этот набор параметров чувствительности, как будет показано ниже, не всегда достаточен для оценок показателей стойкости. Приемлемая точность может быть получена при наличии хотя бы 3...4 значимых экспериментальных результатов по сечениям ОРЭ при разных значениях ЛПЭ.

Связь между показателями стойкости и параметрами чувствительности определяется через заданные требования в виде дифференциальных и/или интегральных потоков ТЗЧ и от используемых приближений. Существует три основных подхода для оценки показателей стойкости [1, 3, 4]:

- интегрирование без учета угловых зависимостей (нормальное падение ТЗЧ);
- модель «тонкой» области с ограничением по углу отсечки;
- модель ЧО в виде прямоугольного параллелепипеда.

Оценка показателей стойкости без учета угловых зависимостей проводится фактически по результатам испытаний ИС при нормальном падении ТЗЧ. В этом приближении при оценке частоты ОРЭ не учитывается изотропный состав излучения [5]:

$$\nu = \int_{L_{zo}}^{L_{max}} \sigma_z(L_z) \cdot \varphi(L_z) dL_z, \quad (1)$$

где $\varphi(L_z)$ – дифференциальный спектр ЛПЭ ТЗЧ для заданных условий эксплуатации.

Зависимость сечений ОРЭ от ЛПЭ строится по результатам испытаний воздействия ионов с разными значениями ЛПЭ и обычно аппроксимируется функцией Вейбулла [1–4]:

$$\sigma_z(L_z) = \sigma_{zs} \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{L_z - L_{zo}}{w} \right)^s \right) \right] \cdot \eta(L_z - L_{zo}), \quad (2)$$

где W и s – коэффициенты аппроксимации; $\eta(x)$ – единичная функция. В программе COSRAD используется другая аппроксимация – функция вида [2]:

$$\sigma_z(L_z) = \sigma_{zs} \cdot \exp\left(-\frac{L_{za}}{L_z}\right), \quad (3)$$

где L_{za} – коэффициент аппроксимации, который пропорционален пороговому значению ЛПЭ.

В простейшем случае в выражении (2) пренебрегают квадратными скобками и аппроксимируют зависимость ступенчатой функцией. В этом случае частота ОРЭ оценивается через интегральную плотность потока ТЗЧ:

$$v = \Phi(L_{zo}) \cdot \sigma_{zs}, \quad (4)$$

где $\Phi(L_z)$ – интегральная плотность потока ТЗЧ. Представленное соотношение имеет очень простой вид и его удобно использовать для грубых оценок, хотя в целом оно неверно. Это соотношение относительно удовлетворительно описывает частоты ОРЭ для ИС с пороговыми значениями менее 30 МэВ·см²/мг и дает очень большую погрешность при больших значениях L_{zo} .

Соотношение (1) при оценках показателей стойкости даже с учетом зависимости сечений ОРЭ от ЛПЭ дает также большую погрешность в той же области пороговых значений ЛПЭ. В этом приближении при оценке частоты ОРЭ не учитывается изотропный состав излучения, т.е. расчеты базируются фактически только на результатах испытаний ИС при нормальном падении ТЗЧ. При этом расчеты с помощью соотношения (1) в области больших значений L_{zo} дают, как будет показано ниже, расхождения до порядка и более «в лучшую сторону» при оценке показателей стойкости по сравнению с другими методами. Данное обстоятельство обусловлено тем, что при падении ТЗЧ под углом θ эффективное значение ЛПЭ увеличивается почти в $1/\cos(\theta)$ раз, что не учитывается в соотношении (1). На самом деле угловая зависимость $1/\cos(\theta)$ практически выполняется для ИС с углами падения ТЗЧ не более 60°, а затем она выходит на некоторое конечное значение при $\theta = 90^\circ$, как правило, с коэффициентом увеличения эффективного значения ЛПЭ не более чем в 4 раза. Только при оценках вероятности возникновения эффектов «прокола» диэлектрика при воздействии ТЗЧ КП данный метод позволяет получить консервативную оценку.

Широкое распространение при оценках показателей стойкости получила модель тонкой области, в которой излучение считается изотропным, а эффективность воздействия определяется через увеличение ЛПЭ по закону обратного косинуса:

$$v \sim \iint \sigma_z\left(\frac{L_z}{\cos(\theta)}\right) \cdot \varphi(L_z, \theta) dL_z d\theta, \quad (5)$$

Совершенно очевидно, что при $\theta = 90^\circ$ получается особая точка, вследствие чего частота ОРЭ может быть очень большой из-за того что, пороговые ЛПЭ стремятся к нулю. Поэтому эта оценка является наиболее консервативной, но в реальных структурах L_{zo} не может равняться нулю. Чтобы избежать интегрирования с особой точкой, вводят угол отсечки, т.е. предельный угол, до которого происходит интегрирование с использованием соотношения (5). В зависимости от выбора угла отсечки могут получаться разные оценки показателей стойкости, в том числе и не самые консервативные.

Возникает два основных вопроса при использовании модели тонкой области. Первый связан с применимостью самого подхода, а именно, насколько применима мо-

дель тонкой области в современных ИС. Ответ очевиден: для современных структур, за исключением КНИ ИС, допущения о «тонкости» чувствительной области в целом не выполняются. Второй вопрос обусловлен влиянием ТЗЧ, падающих под углами, близкими к 90° . В этом случае имеет место некий произвол в выборе угла отсечки. Тем не менее, при корректном вводе подобного ограничения оценки показателей стойкости с помощью модели тонкой области дают вполне корректнее и наиболее консервативные результаты. Подобное приближение используется в программе COSRAD [2].

Наиболее популярным является подход, использующий приближение ЧО в виде некой замкнутой области, как правило, в виде прямоугольного параллелепипеда. В этом приближении предполагается, что энергия возникновения ОРЭ определяется произведением длины хорды, пройденной ТЗЧ внутри ЧО, на ЛПЭ. Если энергия является постоянной величиной, т.е. используется приближение ступенчатой функции чувствительности, то реализуется классическая модель прямоугольного параллелепипеда (RPP), в которой изотропность излучения КП учитывается через распределение хорд внутри ЧО [4].

Модифицированная модель прямоугольного параллелепипеда (IRPP) дополнительно принимает во внимание плавный характер изменения сечений ОРЭ от значений ЛПЭ. В рамках этого подхода частота ОРЭ оценивается следующим образом [4, 6, 7]:

$$v = \frac{S}{4} \int_{L_{zo}}^{L_{\max}} w(L_{zw}) \int_{L_{zo}}^{L_{zw}} \varphi(L_z) \cdot C\left(\frac{\Delta E}{\rho \cdot L_z}\right) dL_z dL_{zw}, \quad (6)$$

где $w(L_z)$ – нормированный дифференциал функции (2); $C(x)$ – интегральное распределение хорд.

Следует отметить, что из-за наличия функции $C(x)$ в выражении (6) появляется еще три неизвестных параметра: a , b , c – размеры чувствительной области. Обычно по умолчанию берут $a = b = \sqrt{\sigma_{zs}}$, $c \approx 1$ мкм. Таким образом, для оценки показателей стойкости помимо заданного радиационного нагружения в рамках подхода требуется семь параметров. Наличие такого количества параметров (степеней свободы) дает большой произвол при оценке показателей стойкости, т.е. фактически можно получить любой результат.

Необходимо отметить, что в рамках данного подхода Пэтерсоном (англ. Edward-Petersen) была предложена упрощенная модель, основанная на использовании «радиационной добротности» ИС по ОРЭ (FOM) [4, 8]:

$$v = K_{orb} \cdot \sigma_{zs} / L_{z0,25}^2, \quad (7)$$

где K_{orb} – коэффициент орбиты ($K_{orb} = 200$ ОРЭ/сутки для геостационарной орбиты); $L_{z0,25}$ – значение ЛПЭ, при котором значение сечения составляет 25 % от сечения насыщения.

В силу допущенных предложений предлагаемый подход дает приемлемые оценки до значений пороговых ЛПЭ не более 40 МэВ·см²/мг.

Следует подчеркнуть, что все рассмотренные выше подходы базируются на структурах и допущениях 80-х годов прошлого века. Ряд из этих допущений не имеет под собой никакого физического обоснования и, более того, не позволяет описывать некоторые эффекты, например многократные сбои, а площадь ЧО, определенная через сечение насыщения, существенно превышает площади чувствительных структур. На самом деле, не может быть фиксированным ЧО (объем собирания заряда), а величина критического заряда меняться в широких пределах в соответствии с соотношением (2).

В действительности ситуация – прямо противоположная. Область собирания (ЧО) увеличивается по мере увеличения ЛПЭ ТЗЧ, а величина критического заряда является постоянной величиной. В этом приближении возможно получить зависимость сечений ОРЭ от ЛПЭ в рамках диффузионного механизма собирания заряда [3, 9, 10]. Например, удовлетворительное соответствие с экспериментальными результатами получают в рамках модели точечной области собирания, при этом параметры модели коррелируют с проектными нормами [11].

Влияние протонов космического пространства

В условиях радиационного воздействия КП в ИС могут иметь место также ОРЭ и от воздействия протонов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ) и солнечных космических лучей (СКЛ). Очевидно, что в общем случае в суммарную частоту ОРЭ могут давать и эффекты, возникающие из-за воздействия протонов. На рис. 1 в качестве примера представлены результаты расчетов количества ОРЭ от типа радиационных воздействий в зависимости от высоты орбиты при пороговом ЛПЭ, равном $1 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$. Нетрудно заметить, что при указанных параметрах чувствительности на средних орбитах (1000...8000 км) доминируют ОРЭ за счет воздействия протонов ЕРПЗ. При этом в наихудшем варианте их количество более чем на два порядка превышает суммарный вклад от всех других воздействий.

Рис. 1. Зависимости относительного количества ОРЭ при $L_{z0} = 1 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ от высоты орбиты за защитой $1 \text{ г}/\text{см}^2$: 1 – протоны ЕРПЗ, 2 – ТЗЧ ГКЛ, 3 – ТЗЧ СКЛ, 4 – протоны СКЛ, 5 – протоны ГКЛ

Вклад протонов в общее количество ОРЭ сильно уменьшается по мере увеличения пороговых значений ЛПЭ (рис. 2), которым можно пренебречь уже при $L_{z0} \geq 10 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$. При этом надо иметь в виду, что фактически ОРЭ в ИС не будет при воздействии протонов с $L_{z0} \geq 15 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$.

На этом же рисунке представлены аналогичные зависимости по оценке количества ОРЭ, сделанные в рамках модели FOM. Хотя абсолютные значения (FOM) по количеству сбоев отличаются почти в 6 раз, характер нормированной зависимости (FOM_n) хорошо согласуется с расчетными данными, выполненных в программе COSRAD. При

этом следует иметь в виду, что расхождения, в первую очередь, обусловлены разными способами аппроксимации сечений ОРЭ от ЛПЭ.

Рис. 2. Зависимости относительного количества ОРЭ при разных значениях ЛПЭ ($L_{z0} = 1 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 / \text{мг}$) для орбиты высотой 3000 км за защитой 1 г/см^2

Сравнение расчетных методов

Как правило, практически все расчетные методы верифицировались для ИС с малыми пороговыми значениями ЛПЭ, что позволяло их сравнивать с данными натурного эксперимента [2]. Вместе с тем, при установлении требований к ИС по отказоустойчивости интересуют области больших пороговых значений ЛПЭ. Здесь прямое сравнение фактически не реально из-за крайне редких событий, которые могут происходить с частотой одно событие за несколько лет. Поэтому важно выбрать такой метод расчета, который с запасом гарантирует требуемую отказоустойчивость.

В настоящей работе проводилось сравнение всех вышеизложенных методов. Часть из них (тонкая область) используется в программе COSRAD с углом отсечки около 87 градусов. Метод представления ЧО в виде прямоугольного параллелепипеда реализован в программе OMERE [12]. Чтобы исключить влияние неопределенностей в алгоритмах аппроксимаций, оптимизации и интегрирования, ряд методов был реализован отдельно в рамках стандартных математических процедур. Кроме того, были выбраны значения пороговых ЛПЭ такими, чтобы отсутствовали эффекты от воздействия протонов, а расчеты проводились для наихудших условий радиационного нагружения, которые имеют место для геостационарной орбиты (см. рис. 1).

На первом этапе проводилось сравнение расчетных спектров ТЗЧ ГКЛ на геостационарной орбите за защитой 1 г/см^2 . В ходе моделирования было получено хорошее совпадение спектров ТЗЧ ЛПЭ, рассчитанных в программах COSRAD и OMERE, поэтому все дальнейшие расхождения в них могут быть обусловлены только используемыми алгоритмами и приближениями при оценках показателей стойкости.

В табл. 1 приведены результаты расчетов по относительному количеству ОРЭ в ИС на геостационарной орбите при воздействии ТЗЧ, проведенных разными методами при изменении пороговых значений ЛПЭ.

Таблица 1. Расчетные оценки относительного количества ОРЭ на геостационарной орбите, проведенные разными методами

L_{zo} , МэВ·см ² /мг	Нормальное падение		Cosrad		OMERE
	Формула (1)	Формула (3)	Формула (4)	IRPP	
15	22	840	67	410	320
40	2,7	0,1	4,7	35	33
80	0,09	0,006	0,5	3,8	4,3

Анализ результатов, представленных в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

- методы оценки показателей стойкости, основанные на нормальном падении ТЗЧ, дают значительную погрешность (до порядка и более) при больших пороговых значениях ЛПЭ, что не позволяет их рекомендовать для использования;

- программа Cosrad дает также заниженные оценки при больших ЛПЭ, что позволяет говорить о не совсем удачных алгоритмах и аппроксимациях, используемых при расчетах. Тем не менее, эта программа показывает хорошее соответствие с результатами натурального эксперимента при относительно небольших значениях пороговых ЛПЭ [2]. Данный вывод подтверждается результатами проведенных оценок при использовании спектра ТЗЧ из программы COSRAD и прямого численного интегрирования по формуле (6) (колонка IRPP). Нетрудно заметить, что в этом случае имеет место хорошая корреляция расчетов с результатами программы OMERE.

На следующем этапе оценки проводились в предположении выполнения условий для модели тонкой области, в качестве которой был выбран параллелепипед со сторонами $1 \times 1 \times 0,01$ см². В табл. 2 – 4 представлены расчеты количества ОРЭ на геостационарной орбите за 10 лет, проведенные различными способами при изменении параметров ЧО. При этом в программе COSRAD угол отсечки составлял 87° и 60° (см. табл. 2). Чтобы исключить неопределенности в аппроксимациях и алгоритмах для обеих программ проводилось также численное интегрирование по формуле (6) (колонка IRPP). Для большей наглядности максимальные и минимальные значения в таблицах при разных L_{zo} выделены.

Таблица 2. Количество ОРЭ на геостационарной орбите, рассчитанное разными методами. Размеры ЧО: $1 \times 1 \times 0,01$ см³

L_{zo} , МэВ·см ² /мг	COSRAD			OMERE		FOM
	ПО (87° ¹⁾)	ПО (60° ²⁾)	IRPP	ПО	IRPP	
15	6,7E+01	7,9E+00	4,1E+02	3,2E+02	3,0E+02	2,0E+02
40	3,8E+00	7,9E-03	3,5E+01	3,3E+01	2,3E+01	2,8E+01
60	1,1E+00	1,4E-04	9,5E+00	1,1E+01	5,2E+00	1,2E+01
80	4,1E-01	2,1E-05	2,8E+00	4,3E+00	1,1E+00	7,0E+00

Таблица 3. Количество ОРЭ на геостационарной орбите,
рассчитанное разными методами.
Размеры ЧО: $1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$

L_{zo} , МэВ·см ² /мг	COSRAD		OMERE	
	ПО	IRPP	ПО	IRPP
15	6,5E-01	1,5E+01	7,8E+00	1,1E+01
40	1,6E-04	1,6E-02	1,2E-03	3,6E-03
60	1,7E-05	2,1E-04	1,2E-04	2,0E-04
80	1,9E-06	7,9E-05	1,3E-05	2,4E-05

Таблица 4. Количество ОРЭ на геостационарной орбите,
рассчитанное разными методами.
Размеры ЧО: $1 \times 1 \times 0,25 \text{ см}^3$

L_{zo} , МэВ·см ² /мг	COSRAD		OMERE	
	IRPP	ПО (87° ¹⁾)	ПО	IRPP
15	1,0E+02	6,7E+01	6,4E+01	6,3E+01
40	3,0E+00	1,1E+00	2,3E+00	2,1E+00
80	6,0E-02	4,0E-01	6,0E-02	4,0E-02

Примечания к табл. 2–4: ¹⁾ – угол отсечки 87°; ²⁾ – угол отсечки 60°.

Анализ полученных данных показывает, что в случае устранения неопределенностей в методах аппроксимаций и расчетов результаты по программам COSRAD и OMERE коррелируют между собой (столбцы IRPP). По сути дела, это означает, что исходные радиационные данные (спектры ТЗЧ) близки между собой. Собственное ПО COSRAD дает наименьшее количество сбоев, при этом при угле отсечки 60° результаты получаются даже еще меньше, чем при оценках по методу нормального падения. Поэтому данный угол отсечки не рекомендуется использовать при расчетах.

Даже при угле отсечки, равном 87°, оценки с помощью программы COSRAD дают наименьшие значения по количеству сбоев как для тонкой ЧО (см. табл. 2), так и для куба (см. табл. 3). В первом случае значения можно увеличить, используя больший угол отсечки. Еще раз подчеркнем, что различия в программах COSRAD и OMERE обусловлены различными используемыми алгоритмами при оценках показателей стойкости.

Вместе с тем использование модели IRPP позволяет получать вполне приемлемые результаты, но слишком много неопределенностей при этом имеет место (требуется семь подгоночных параметров). Решение, на наш взгляд, видится в применении чувствительной области с типовыми параметрами. Проведенный анализ показывает, что, например, наилучшее соответствие при пересчете параметров чувствительности от ионов к протонам имеет место при соотношении параметров чувствительной области как 1:1:0,5 [13]. Фактически такие же результаты получаются исходя из диффузионной модели, в которой максимальное уменьшение пороговых ЛПЭ не превышает 4 раз. Поэтому в качестве рекомендации при расчетах предлагаем использовать параметры ЧО в следующем соотношении: 1:1:0,25 (см. табл. 4). В этом случае при угле отсечки, равном 87°, получается хорошая корреляция всех результатов. Поэтому именно этот случай и надо брать при оценках показателей стойкости.

Группы стойкости и требования к ИС

В общем случае требования по радиационной стойкости к ИС при воздействии ТЗЧ могут быть заданы в виде ограничений на параметры чувствительности:

только пороговые значения ЛПЭ;

пороговые значения ЛПЭ и сечение насыщения;

ограничений на показатели стойкости:

для заданных условий эксплуатации;

для типовой выбранной орбиты (обычно геостационарной);

ограничения на «радиационную добротность» ИС по чувствительности к ОРЭ, под которой понимают параметр вида $\sigma_{zs}/L_{z0.25}^2$ или σ_{zs}/L_{z0}^2 .

Установившаяся практика в настоящее время оперирует со следующими значениями пороговых ЛПЭ по эффектам сбоев и отказов (табл. 5), при этом для космического применения используются изделия с уровнем стойкости не ниже второй группы. Используемая классификация ориентируется на наиболее жесткие условия эксплуатации, которые реализуются на орбитах полета КА (табл. 6).

Таблица 5. Классификация групп стойкости ИС
при воздействии ТЗЧ

Группа стойкости	Значение пороговых ЛПЭ, МэВ·см ² /мг		
	Одиночные отказы (ОО)	Одиночные сбои (ОС)	Множественные сбои (МС)
1	15	2(3)	15
2	40	15	40
3	60	40	60
4	80(100)	60	80(100)

Табл.6. Относительное количество ОРЭ
за 10 лет полета для различных орбит

Пороговые ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	Число ОРЭ за 10 лет			
	500 км, 60°	1000 км, 60°	5000 км, 60°	36000 км, 0°
15	7,6	9,2	22	62
40	0,46	0,6	1,4	4,2
60	0,13	0,17	0,4	1,2
80	0,048	0,062	0,15	0,44

Следует отметить, что требования по вероятности отказов ИС зависят не только от пороговых значений ЛПЭ, но и от сечения насыщения, значения которых в требованиях, как правило, не приводятся. Кроме того, необходимо для реализации этих требований внести соответствующие изменения (дополнения) в действующие нормативные документы по испытаниям ИС на радиационную стойкость по одиночным эффектам.

Устанавливать требования по сбоям в общем случае нет необходимости, но рекомендуется приводить справочную информацию по параметрам чувствительности по этим эффектам, чтобы разработчики аппаратуры могли эффективно с ними бороться. В тех же редких случаях, когда эти требования необходимо вводить, уровень пороговых значений ЛПЭ сдвигается на один уровень ниже, и первая группа начинается с пороговых значений ЛПЭ, равных 2(3) МэВ·см²/мг. Данный уровень обусловлен, с одной сто-

роны, физическими ограничениями при возникновении сбоев в современных ИС, а, с другой, – возможностями применения схемотехнических и технологических методов повышения сбоеустойчивости, которые не приводят к заметному снижению функциональных и электрических характеристик ИС.

Отдельно следует рассматривать функциональные и множественные сбои (МС). В общем случае нужно разделить МС на две группы: МС, которые возникают в одном слове данных, и МС, имеющие место одновременно в ячейках памяти по разным адресам [14, 15]. Во втором случае МС формально ни чем не отличаются от классических одиночных сбоев, только сечение их увеличивается, поэтому для этого случая применим вышеизложенный подход. Однако при наличии МС в одном слове методы их парирования сильно усложняются. Поэтому, на наш взгляд, к этим эффектам необходимо предъявлять требования, и они должны быть эквивалентны ограничениям, используемым для эффектов отказов (см. третий столбец табл. 5).

Как правило, параметры чувствительности управляющих регистров ИС по эффектам сбоев практически те же самые, что и для элементов хранения данных. Парирование этих эффектов в реальной аппаратуре обычно происходит переинициализацией электронного блока на программном уровне. Поэтому для них можно использовать тот же подход, что и для обычных сбоев, с учетом того, что количество (сечение) таких элементов незначительно. Если возникновение функциональных сбоев критично в конкретной ИС, то для нее также можно задать требования, аналогичные эффектам отказов.

Отдельно следует рассматривать вопрос задания требованиям по эффектам сбоев для аналоговых и смешанных ИС, в которых доминируют эффекты типа «иглоков» [1, 2]. В этих случаях целесообразно получать справочные значения с обязательным указанием максимальных значений амплитуд и длительностей сигналов.

Совершенно очевидно, что задание требований в виде ограничений на пороговые значения ЛПЭ является не полным, но позволяет упростить работу по их подтверждению. В идеале, для нормальной оценки сбоеустойчивости и отказоустойчивости электронной аппаратуры, необходимо получать зависимость сечений одиночных радиационных эффектов от ЛПЭ или хотя бы еще один параметр чувствительности – сечение насыщения, а также более корректно оценивать нормы испытаний.

Тем не менее для ряда типовых случаев можно получить консервативные оценки без наличия сведений по сечениям ОО. В этом случае можно предположить, что для схем с относительно высокими пороговыми значениями ЛПЭ (более 40 МэВ·см²/мг) использовать консервативные оценки по сечению насыщения, что его значение не превышает 1 % от площади кристалла. Другими словами, для современных СБИС можно принять, что сечение насыщения менее 10⁻² см². В этом приближении при разных пороговых значениях ЛПЭ можно оценить количество ОРЭ.

Более корректный вариант реализуется по другому алгоритму: необходимо обеспечить требуемую вероятность отказа изделия за время его активного существования. Очевидно, что в этом случае необходимо эту вероятность сравнивать с вероятностью безотказной работы самого изделия, которая определяется через среднее время наработки на отказ T_{cp} . Другими словами, необходимо обеспечить условие:

$$\nu < 1/T_{cp}. \quad (8)$$

В табл. 7 представлены расчетные оценки ограничений на сечения насыщения при различных пороговых значениях ЛПЭ, при которых выполняется условие $\nu \approx 0,1/T_{cp}$,

т.е. вклад в уменьшение времени наработки за 10 лет САС КА на отказ не превышает 10 %.

Таблица 7. Ограничения на сечения насыщения
при заданных требованиях по пороговым значениям ЛПЭ

Пороговое ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	Сечение насыщения, не более см ²
15	$1,5 \cdot 10^{-3}$
40	$2,2 \cdot 10^{-2}$
60	$8,0 \cdot 10^{-2}$
80	$2,2 \cdot 10^{-1}$

Таким образом, даже при задании ограничений на пороговые значения ЛПЭ более 40 МэВ·см²/мг обеспечиваются необходимые требования по отказоустойчивости ИС.

Заключение

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие краткие выводы:
в общем случае показатели стойкости зависят не только от пороговых значений ЛПЭ, но и от сечения насыщения, а также и от формы ЧО;

оценки показателей стойкости при одних и тех же параметрах чувствительности в области относительно больших пороговых значений ЛПЭ имеют очень большой разброс, обусловленный различиями в алгоритмах аппроксимации и расчетов;

оценки показателей стойкости без учета угловых зависимостей падения ТЗЧ приводят к существенному «улучшению» результатов и являются некорректными;

наиболее консервативные оценки показателей стойкости получаются в приближении тонкой области с углами отсечки около 90°;

расчетные оценки показателей стойкости рекомендуется проводить при параметрах чувствительной области в следующем соотношении длины, ширины и глубины: 1:1:0.25 или при угле отсечки, равном 87°;

при воздействии ТЗЧ ограничения на пороговые значения ЛПЭ зависят от параметров миссии, но рекомендуется использовать изделия с пороговыми значениями ЛПЭ не менее 40 МэВ·см²/мг;

в современных СБИС рекомендуется подтвердить отсутствие многократных сбоев в одном слове данных при тех же требованиях, что и для одиночных отказов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание / Под ред. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015.
2. Ионизирующее излучение космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / Под ред. Г.Г. Райкунова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.
3. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь, 2004.
4. Petersen Ed. Single Event Effects in Aerospace. Wiley-IEEE Press, 2011.
5. РД В 319.03.24. Микросхемы интегральные. Методы испытаний и оценки стойкости больших и сверхбольших интегральных схем к одиночным сбоям от воздействия отдельных высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства. Мытищи, 22 ЦНИИИ, 1996.
6. Tylka A.J., Adams J.H., Boberg P.R., Brownstein B., Dietrich W.F., Flueckiger E.O., Petersen E.L., Shea M.A., Smart D.F., Smith E.C. CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code. IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 44, No.6, pp.2150-2160, Dec.1997.
7. Pickel J.C. Single-event effects rate prediction. IEEE Trans. Nucl. Sci. 43, 483-495 (1996).
8. Petersen E.L., Langworthy J. B., Diehl S.E. «Suggested Single Event Upset Figure of Merit». IEEE Trans. Nut.Sci., NS-30, 6, pg. 4533 (1983).
9. Edmonds L.D. «SEU Cross Sections Derived for a Diffusion Analysis» // IEEE Trans. Nuc. Sci., NS-43, 3207, (1996).

10. Chumakov A.I. «An evaluation of the sensitivity of integrated circuits to single event effects for the point charge collection area» // Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. №. 1. P. 27–32.
11. Chumakov A.I. Modified Charge Collection Model by Point Node for SEE Sensitivity Estimation / Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS. Moscow. 2015. P. 511–515.
12. Peyrard P.F., Beutier T., Serres O., Chatry C., Ecoffet R., Rolland G., Boscher D., Bourdarie S., Inguibert C., Calvel P., Mangeret, R. OMERE 2.0 a toolkit for space environment(2004) European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, (536), art. no. HP4. P. 639–641.
13. Weulersse C., Wrobel F., Miller F., Carrière T., Gaillard R., Vaillé J.-R., Buard N. A Monte-Carlo engineer tool for the prediction of SEU proton cross section from heavy ion data (2011) Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS, art. no. 6131348. P. 376–383.
14. Boruzdina A.B., Grigor'ev N.G., and Ulanova A.V. Effect of topological placement of memory cells in memory chips on multiplicity of cell upsets from heavy charged particles // Russian Microelectronics. 2014. Vol. 43. №. 2. P. 96–101,
15. Chumakov A.I., Sogoyan A.V., Boruzdina A.B., Smolin A.A., Pechenkin A.A. Multiple Cell Upset Mechanisms in SRAMs/Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS. Moscow. 2015. P. 170–174.

REFERENCES:

1. Electronic components radiation hardness: Science publication / Edited by A.I. Chumakov. Moscow. :NRNU MEPhI, 2015. (In Russian).
2. Ionizing space radiation and its exposure to spacecraft devices / Edited by G.G. Raykunov. Moscow: FIZMATLIT. 2013 (In Russian).
3. Chumakov A.I. Space radiation exposure to Integrated Circuits. Moscow: Radio I svyaz. 2004. (In Russian).
4. Petersen Ed. Single Event Effects in Aerospace. Wiley-IEEE Press, 2011.
5. RD V 319.03.24. Mikroskhemy integral'nye. Metody ispytaniy i ocenki stojkosti bol'shih i sverhbol'shih integral'nyh skhem k odinochnym sboyam ot vozdejstviya ot del'nyh vysokoenergetichnyh tyazhelyh zaryazhennyh chastic i protonov kosmicheskogo prostranstva. Mytishchi, 22 CNII, 1996. (In Russian).
6. Tylka A.J., Adams J.H., Boberg P.R., Brownstein B., Dietrich W.F., Flueckiger E.O., Petersen E.L., Shea M.A., Smart D.F., Smith E.C. CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code. IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 44, No.6, pp.2150-2160, Dec. 1997.
7. Pickel J.C. Single-event effects rate prediction. IEEE Trans. Nucl. Sci. 43, 483-495 (1996).
8. Petersen E.L., Langworthy J. B., Diehl S.E. Suggested Single Event Upset Figure of Merit. IEEE Trans. Nuc.Sci., NS-30, 6, pg. 4533 (1983).
9. Edmonds L.D. SEU Cross Sections Derived for a Diffusion Analysis. IEEE Trans. Nuc. Sci., NS-43, 3207, (1996).
10. Chumakov A.I. «An evaluation of the sensitivity of integrated circuits to single event effects for the point charge collection area» // Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. №. 1. P. 27–32.
11. Chumakov A.I. Modified Charge Collection Model by Point Node for SEE Sensitivity Estimation / Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS. Moscow. 2015. P. 511–515.
12. Peyrard P.F., Beutier T., Serres O., Chatry C., Ecoffet R., Rolland G., Boscher D., Bourdarie S., Inguibert C., Calvel P., Mangeret, R. OMERE 2.0 a toolkit for space environment(2004) European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, (536), art. no. HP4. P. 639–641.
13. Weulersse C., Wrobel F., Miller F., Carrière T., Gaillard R., Vaillé J.-R., Buard N. A Monte-Carlo engineer tool for the prediction of SEU proton cross section from heavy ion data (2011) Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS, art. no. 6131348. P. 376–383.
14. Boruzdina A.B., Grigor'ev N.G., and Ulanova A.V. Effect of topological placement of memory cells in memory chips on multiplicity of cell upsets from heavy charged particles // Russian Microelectronics. 2014. Vol. 43. №. 2. P. 96–101,
15. Chumakov A.I., Sogoyan A.V., Boruzdina A.B., Smolin A.A., Pechenkin A.A. Multiple Cell Upset Mechanisms in SRAMs/Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS. Moscow. 2015. P. 170–174.