

Уточненная расчетная оценка сбое- и отказоустойчивости критичных изделий ЭКБ с учетом фактической массовой защищенности

С. В. Голованов, *golovanov.sv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Мещеряков, *mescheryakov.aa@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. Ю. Мурзин, *murzin.vy@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

П. Б. Лагов, *д. т. н., доцент, hard@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время на предприятиях ракетно-космической промышленности при оценке сбое- и отказоустойчивости бортовой аппаратуры (БА) к одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) используется упрощенный подход, при котором расчет проводится для минимального значения массовой толщины защиты (г/см^2) потенциально-чувствительных электро-радиоизделий (ЭРИ), определяемого, как правило, по минимальной толщине стенки рассматриваемого прибора. При этом не учитываются все конструктивные элементы приборов БА, конструктивные элементы космического аппарата (КА) и соседних приборов, что во многих случаях приводит к существенному завышению результатов расчетной оценки частоты ОРЭ, особенно для ИМС высокой степени интеграции.

Пренебрежение фактической массовой защитой может потребовать применения избыточных мероприятий для обеспечения сбое- и отказоустойчивости.

В работе предлагается усовершенствованный подход к проведению расчетов сбое- и отказоустойчивости чувствительных ЭРИ и БА в целом к воздействию ТЗЧ и ВЭП по ОРЭ, который заключается в использовании программ расчета поглощенных доз методом секторирования в трехмерных сборках, что, в свою очередь, позволяет определить минимальную, максимальную и среднюю массовую защищенность конкретного ЭРИ с учетом полного конструктива БА и КА.

Ключевые слова: тяжелые заряженные частицы, высокоэнергетичные протоны, массовая защита, космический аппарат, метод секторирования, сбоеустойчивость, отказоустойчивость

Refined Calculation Assessment of Failure and Fault Tolerance of Sensitive Electronic Components with Actual Mass Protection

S. V. Golovanov, *golovanov.sv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Meshcheryakov, *mescheryakov.aa@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. Yu. Murzin, *murzin.vy@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

P. B. Lagov, *Dr. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., hard@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. Nowadays rocket and space industry enterprises use a simplified method to evaluate failure and fault tolerance of the onboard equipment to single event effects (SEEs), when the calculation is performed for the minimum mass protection thickness (g/cm^2) of potentially sensitive electronic components determined, as a rule, by the minimum wall thickness of the device under consideration. In this case, all structural elements of the onboard equipment, spacecraft, and neighboring devices are not included, which, in many cases, leads to a significant overestimation of the calculated SEEs frequency especially for large scale integration ICs.

Neglecting the actual mass protection may require redundant measures to ensure failure and fault tolerance.

The work proposes an improved approach of calculating failure and fault tolerance of sensitive electronic components and onboard equipment to the impact of heavy charged particles and high-energy protons that causes SEEs, which consists in using programs for calculating absorbed doses by the sectorization method in three-dimensional models, which makes possible to determine the minimum, maximum, and average mass protection of electronic components with the complete design of the onboard equipment and spacecraft.

Keywords: heavy charged particles, high-energy protons, mass protection, spacecraft, sectorization method, failure tolerance, fault tolerance

1. Введение

В настоящее время при разработке бортовой аппаратуры космических аппаратов повышенное внимание уделяется обеспечению сбое- и отказоустойчивости [1]. Основным правилом, которым руководствуются при обеспечении сбое- и отказоустойчивости БА, является применение ЭРИ с параметрами чувствительности к воздействию ТЗЧ КП, позволяющими исключить или минимизировать возникновение ОРЭ. Однако усложнения функционирования РЭА влечет необходимость применения изделий ЭКБ с малыми топологическими нормами, которые являются потенциально-чувствительными к ОРЭ.

Конструктивное исполнение прибора в основном определяется его функциональным назначением и заданными требованиями по стойкости к воздействию ионизирующих излучений космического пространства по дозовым эффектам при эксплуатации КА на штатных орбитах. Величина массовой защищенности каждого активного ЭРИ определяется с учетом защиты корпусом ЭРИ, конструктивными элементами прибора и КА, а также и соседними приборами и блоками аппаратуры, установленной на КА. Исследуемый прибор может как состоять из одной платы внутри корпуса с однородными стенками, так и представлять собой наборную конструкцию с внутренними перегородками, ребрами жесткости; иметь в составе отдельные конструктивные элементы с высокой плотностью материала; располагаться внутри и снаружи КА, стоять обособленно либо в окружении других приборов. Все вышеуказанные особенности конструкции прибора определяют различные значения массовой защищенности ЭРИ, которые в конечном счете влияют как на суммарное значение поглощенной дозы, воздействующей на ЭРИ, так и на результаты расчета количества возможных ОРЭ.

Важно отметить, что проведение более точного расчета позволит во многих случаях избежать мероприятий по доработке БА или необоснованной замены типов ЭРИ, которые, в свою очередь, могут повлечь существенное и по сути необоснованное увеличение сроков разработки и изготовления БА.

Применение предложенного подхода к расчету ОРЭ на основе уточненных значений массовой за-

щиты критичных ЭРИ средствами БА и КА позволит не только усовершенствовать методику расчетов ОРЭ, но и оптимизировать работы по проектированию бортовой аппаратуры в целом.

2. Методика расчета частоты ОРЭ с учетом конструкции БА КА

2.1. Методика расчета массовой защиты методом секторирования

Метод секторирования успешно применяется при расчете дозовых нагрузок как космических аппаратов, так и ЭРИ [3, 4]. Для проведения расчетов величина массовой защиты X [г/см²] вычисляется методом секторирования путем разбиения 4π пространства (сфера) на сектора. Сектором с равной массовой величиной защиты считается сектор вокруг направления (луча), описываемого тремя направляющими косинусами, массовая величина вдоль которого и считается массовой величиной защиты в секторе [5–7].

Данный подход позволяет определить наименьшее, среднее и наибольшее значения массовой величины защиты в конкретной точке трехмерного объекта, выполненного в произвольной системе автоматизированного проектирования (далее САПР), и использовать полученные результаты для расчетов оценок сбое- и отказоустойчивости ЭРИ и РЭА при заданных значениях ТЗЧ и ВЭП. Оценка минимальной величины массовой защиты в модели «сфера» (4π -пространства) производится по наименее защищенному направлению.

Применяемые в настоящее время программные комплексы (ПК) типа программы «ДОЗА», FASTRAD, GROONT и др. были разработаны для проведения расчета локальных дозовых нагрузок для бортовой аппаратуры КА, который включает в себя частные программы, необходимые для визуализации исследуемого объекта, расчета массовой толщины защиты в телесном угле, расчета поглощенной дозы в этом телесном угле и полной поглощенной дозы со всех направлений в телесном угле 4π ср.

На рис. 1 представлен алгоритм работы данных программных комплексов.



Рис. 1. Алгоритм работы ПК для расчета массовой величины защиты

Входными данными для разработанного ПК являются: трехмерная твердотельная модель космического аппарата, выполненная в САПР; количество секторов сканирования; данные о плотностях входящих в него компонентов; зависимости поглощенной дозы от массовой величины защиты; координаты расчетных точек.

После того как в программу внесена вся необходимая информация, проводится расчет элементарной поглощенной дозы $\Delta D_j(r)$, полученной в пределах j -го телесного угла.

Направление Ω_j луча из рассматриваемой точки r в j -м телесном угле определяется путем задания углов φ_j (долгота) и ψ_j (широта). После чего определяются массовая величина защиты $X_j(r, \Omega_j)$ материалов аппаратуры и конструкции КА, пересекаемых этим лучом.

Величина массовой защиты X_j [г/см²] в выбранной точке и по выбранному направлению определяется по формуле (2.1):

$$X_j = \sum_{i=1}^n d_i \rho_i, \quad [\text{г/см}^2], \quad (2.1)$$

где d_i — длина пересечения лучом слоя защиты i -го блока, см;

ρ_i — плотность материала i -го блока защиты, пересеченного лучом, г/см³;

n — количество слоев защиты, пересеченных лучом.

Для определения длин пересечений рассматриваемого луча с блоками модели КА применяются: функция вычисления пересечений луча с каждым блоком модели КА, функция измерения длины пересечения лучом слоя защиты блока и модели КА.

С учетом результатов применения упомянутых функций значение средней массовой толщины защиты $X_{\text{средн}}(r, \Omega_j)$ всех блоков модели КА, пересекаемых рассматриваемым лучом, вычисляется по формуле (2.2).

$$X_{\text{средн}} = \frac{\sum_{j=1}^j X_j \Omega_j}{4\pi}, \quad (2.2)$$

где X_j — массовая толщина защиты в телесном угле Ω_j .

2.2. Методика расчета частоты одиночных сбоев и вероятности возникновения отказов с учетом величины массовой защиты

В методике предлагается использовать информацию о защищенности конкретного потенциально-чувствительного изделия ЭКБ при расчете частоты сбоев и отказов. Расчетно-экспериментальный метод оценки стойкости БА к воздействию ТЗЧ и ВЭП основан на расчете частоты сбоев и вероятности отказов БА от действия заряженных частиц космического пространства по методике изложенной в РД 134-0139-2005 [2] с учетом аппроксимации методом Вейбулла для ТЗЧ и Бендела для ВЭП:

$$\nu_{РЭА} = \sum_{i=1}^n n_{ЭРИ i} \times \left(\int_{L_0}^{L_{\max}} \sigma_i(L) \varphi_{ТЗЧ}(L) dL + \int_{E_0}^{E_{\max}} \sigma_i(E) \varphi_p(E) dE \right),$$

где $\nu_{РЭА}$ — число сбоев (отказов) в РЭА в единицу времени, c^{-1} ;

$\varphi_{ТЗЧ}(L)$ — дифференциальный ЛПЭ-спектр плотности потока ТЗЧ, $част \cdot см^{-2} \cdot c^{-1} \cdot МэВ^{-1} \times см^{-2} \cdot мг$ в зависимости от величины массовой защиты;

$\varphi_p(E)$ — дифференциальный энергетический спектр плотности потока протонов, $част \cdot см^{-2} \times c^{-1} \cdot МэВ^{-1}$ в зависимости от величины массовой защиты;

L_0 — пороговое значение ЛПЭ, $МэВ \cdot см^2 \times мг^{-1}$;

E_0 — пороговое значение энергии протонов, МэВ;

L_{\max} — максимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ, $МэВ \cdot см^2 \cdot мг^{-1}$;

E_{\max} — максимальное значение энергии протонов в спектре протонов, МэВ;

$\sigma_i(L), \sigma_i(E)$ — зависимости сечений возникновения сбоев или одиночных отказов ЭРИ от ЛПЭ ТЗЧ и энергии протонов соответственно, $см^2$;

$n_{ЭРИ i}$ — количество электронных компонентов i -го типа, примененных в РЭА;

n — число примененных в РЭА типов ЭРИ с различными зависимостями $\sigma_i(L), \sigma_i(E)$.

Частота сбоев и возможных отказов критичных ЭРИ вычисляется отдельно для заряженных частиц СКЛ, ГКЛ и ЕРПЗ с учетом массовой величины защиты, полученной при расчете методом секторирования.

В качестве примера на рис. 2 представлен график зависимости $\varphi_{ТЗЧ}(L)$ тяжелых заряженных частиц СКЛ [8] от величины массовой защиты для различных значений L_0 . Из рис. 2 видно, что более высокий уровень защиты обеспечивает ослабление $\varphi_{ТЗЧ}(L)$ в несколько раз. Аналогичные зависимости приведены в [9] и могут быть получены в программах cosrad [10] или spenvis [11].

Предлагаемая методика расчета с использованием величины массовой защиты, полученной с помощью программ расчета поглощенных доз заряженных частиц в трехмерных сборках методом секторирования (рис. 3), является дополнением к существующим методикам расчетной оценки, приведенным в РД 134-0139-2005 [2], и предназначена для уточненной оценки количества одиночных сбоев и вероятности безотказной работы БА, в которых применены ЭРИ со значениями пороговых ЛПЭ менее 40 (60) МэВ·см²/мг, т.е. для случаев, когда нельзя однозначно утверждать о сбое или отказоустойчивости РЭА без соответствующих расчетных оценок.

3. Условия и результаты исследования

При расчете ОРЭ вместо общепринятой консервативной оценки с использованием минимальной величины массовой защиты [2] применен метод секторирования. Для вычисления необходимых (промежуточных) значений $\varphi_{ТЗЧ}(L)$ и $\varphi_p(E)$ в зависимости от полученных значений массовой защиты был применен метод линейной интерполяции:

$$\varphi_{ИСК} = (\varphi_1 - \varphi_0) \frac{X_{ИСК} - X_0}{X_1 - X_0}, \quad (3.3)$$

где X_1 и X_0 — промежуточные значения массовой защиты ($X_0 \leq X_{ИСК} \leq X_1$), г/см²;

φ_1 и φ_0 — значения плотности потоков ТЗЧ или ВЭП в зависимости от величины массовой защиты X_1 и X_0 соответственно.

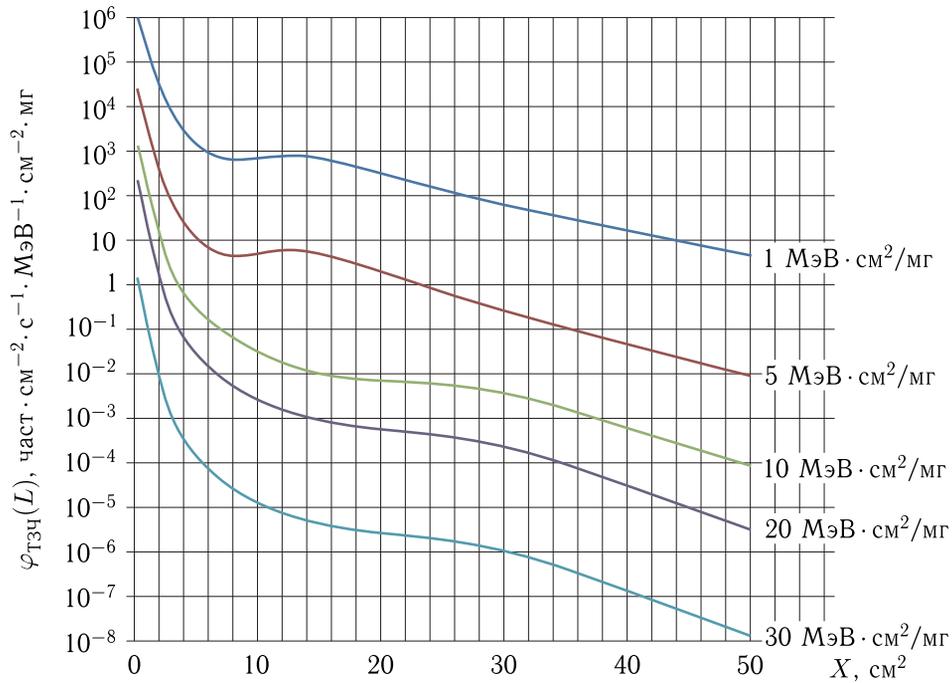


Рис. 2. Зависимость потока частиц от массовой защиты [8]

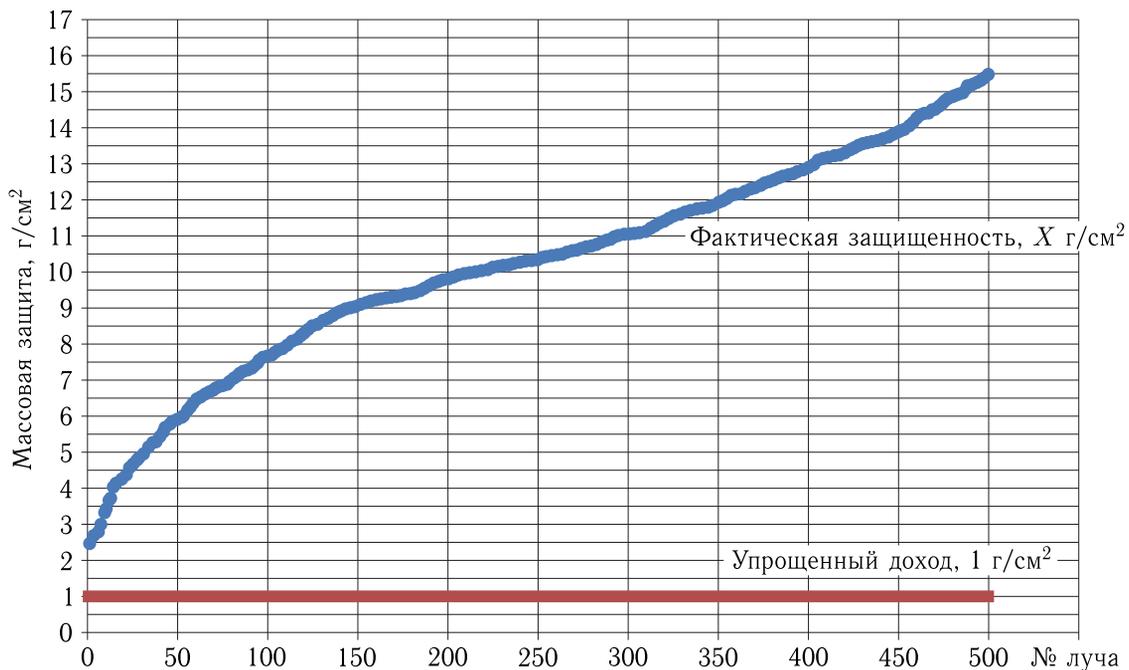


Рис. 3. Фактическая защищенность, полученная методом секторирования

В данной статье в качестве примера рассмотрены ЭРИ с характерными параметрами чувствительности к ОРЭ с использованием дифференциальных спектров для штатной орбиты МКС (~408 км) [8].

Частота сбоев за сутки $\nu(1)$ рассчитана для массовой защиты $X = 1 \text{ г/см}^2$ [2], а частота сбоев $\nu(X)$ рассчитана на основе уточненной массовой защиты с использованием предложенной методики.

Частота возможных отказов для различных толщин массовой защиты рассчитана для САС 5 лет.

Результаты расчетов одиночных/функциональных сбоев и возможных отказов для значений по [2] представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Анализ результатов

Результаты сравнительной расчетной оценки между значениями частоты сбоев и ВБР при использовании предложенной методики на основе уточненной величины массовой защиты и при консервативной оценке с минимальной величиной массовой защиты (обычно используется ~ 1 г/см²) [2] приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Из полученных результатов следует, что учет фактической защищенности ЭРИ позволяет снизить расчетные значения частоты одиночных эффектов в $\geq 3^{-10}$ раз. Разумеется, для окончательного вывода о стойкости аппаратуры к ОРЭ надо учитывать не только расчетные величины ОС/ФС и ВБР, но и примененные схемотехнические методы защиты от одиночных эффектов. Тем не менее предложенный подход позволяет существенно усовершенствовать методику расчетов ОРЭ за счет использования данных о фактической защищенности критичных ЭРИ, что, в свою очередь, позволяет обоснованно оценить необходимость разработки и применения дополнительных мер защиты для конкретного случая применения критичных ЭРИ в РЭА.

Таблица 1. Расчетные значения одиночных сбоев

Наименование ЭРИ	ТЗЧ		ВЭП		Частота сбоев		$\nu(1 \text{ г/см}^2)/\nu(X, \text{ г/см}^2)$
					Упрощенный подход [2]	Уточненный подход	
	$L_0, \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$	$\sigma_S \text{ ТЗЧ, см}^2/\text{ЭРИ}$	$E_0, \text{ МэВ}$	$\sigma_S \text{ ВЭП, см}^2/\text{ЭРИ}$	$\nu(1 \text{ г/см}^2)$	$\nu(X, \text{ г/см}^2)$	
ЦАП № 1	16	$8,2 \cdot 10^{-6}$			$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$ (3)	20
АЦП № 1	2	$1,7 \cdot 10^{-2}$	15	$3 \cdot 10^{-9}$	45	3 (10)	15
Драйвер № 1	2	$5,0 \cdot 10^{-4}$	3,6	$1,62 \cdot 10^{-9}$	29	0,6 (25)	49
Стабилизатор № 1	33	$2,0 \cdot 10^{-5}$			$4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-12}$ (7)	10^5
Супервизор питания № 1	33	$3,0 \cdot 10^{-5}$			$7 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-12}$ (8)	10^5
ШИМ-контроллер № 1	1	$1 \cdot 10^{-4}$	12	$5,5 \cdot 10^{-10}$	8	0,2 (23)	45
ОУ № 1	17	$2 \cdot 10^{-5}$			$8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$ (6)	2100
АЦП № 2	7	$1 \cdot 10^{-3}$	25	$8,4 \cdot 10^{-10}$	4	0,2 (17)	18
ПЗУ № 1	6	$5 \cdot 10^{-6}$	11,6	$1,72 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$ (12)	10
ОЗУ № 1	6	$1,88 \cdot 10^{-2}$	12	$1,22 \cdot 10^{-8}$	35	3 (27)	12
Микропроцессор № 1	6,5	$3,12 \cdot 10^{-2}$	12,7	$5,6 \cdot 10^{-8}$	421	9 (35)	47
АЦП № 3	1	$1 \cdot 10^{-4}$	30	$1 \cdot 10^{-10}$	6	$8 \cdot 10^{-2}$ (5)	80
СОЗУ № 1	1	$1,8 \cdot 10^{-5}$	15	$4 \cdot 10^{-10}$	2	0,2 (15)	10
ПЛИС № 1	1	$8,85 \cdot 10^{-4}$	1,9	$7,37 \cdot 10^{-9}$	142	2 (30)	72
ПЗУ № 2	6,57	$1,4 \cdot 10^{-5}$	12,9	$5,31 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$ (8)	7

Таблица 2. Расчетные значения одиночных отказов

Наименование ЭРИ	ТЗЧ		ВЭП		Частота возможных отказов		$\nu(1 \text{ г/см}^2)/\nu(X, \text{ г/см}^2)$
					Упрощенный подход [2]	Уточненный подход	
	$L_0, \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$	$\sigma_S \text{ ТЗЧ, см}^2/\text{ЭРИ}$	$E_0, \text{ МэВ}$	$\sigma_S \text{ ВЭП, см}^2/\text{ЭРИ}$	$\nu(1 \text{ г/см}^2)$	$\nu(X, \text{ г/см}^2)$	
ЦАП № 1	7	$9,8 \cdot 10^{-6}$	13,9	$3,2 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$ (15)	25
СОЗУ № 1	17	$7,9 \cdot 10^{-4}$			$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$ (10)	5
ШИМ-контроллер № 1	7	$3 \cdot 10^{-5}$	13,9	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-3}$ (25)	4
ОУ № 1	18	10^{-3}			$2,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$ (9)	5
ПЗУ № 1	16	$3 \cdot 10^{-4}$			$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$ (7)	2
ПЗУ № 2	16	$5 \cdot 10^{-3}$			$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$ (8)	5
Микроконтроллер № 1	7	$1,5 \cdot 10^{-2}$	60	$2 \cdot 10^{-11}$	16	1 (34)	16
Микроконтроллер № 2	7	$4,7 \cdot 10^{-3}$	13,9	$5,3 \cdot 10^{-9}$	10	3 (25)	3
Оптопара № 1	40	$0,43 \cdot 10^{-2}$			$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$ (7)	3
LVDS-драйвер № 1	16	$4,02 \cdot 10^{-7}$			$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$ (15)	8
LVDS-драйвер № 2	7	$7 \cdot 10^{-5}$	15	$1 \cdot 10^{-10}$	0,2	$5 \cdot 10^{-2}$ (27)	4
ПЗУ № 1	6,56	$6,4 \cdot 10^{-5}$	12,88	$3,30 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$ (17)	3
Микропроцессор № 1	14,2	$9,04 \cdot 10^{-5}$	32	$2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$ (23)	3
LVDS-драйвер № 3	4	$3,3 \cdot 10^{-5}$	7,34	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$ (39)	7
DC/DC-преобразователь	15	$1 \cdot 10^{-3}$			$8 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-4}$ (16)	8

Заключение

В статье предлагается новый подход к расчетам стойкости к воздействию ТЗЧ по одиночным радиационным эффектам, который заключается в использовании программ расчета поглощенных доз заряженных частиц в трехмерных сборках методом секторирования для оценки величин массовой защиты ЭРИ конструктивными элементами БА и КА с целью проведения уточненного расчета количества ОРЭ.

В статье представлены известные аналитические выражения для проведения соответствующих

расчетов. Предложенный подход к расчету стойкости БА к воздействию ТЗЧ и ВЭП и разработанная методика оценки позволяют устранить имеющиеся упрощения в расчетах при использовании консервативной оценки, возникающие из-за неполного учета величин массовой защиты. Это позволит исключить завышение или занижение количества возможных ОРЭ от воздействия ТЗЧ и ВЭП, полученных по результатам консервативной оценки, которые впоследствии могут привести к необходимости проведения избыточных дополнительных мероприятий в части обеспечения стойкости БА к воздействию ТЗЧ и ВЭП по одиночным сбоям и отказам.

Список литературы

1. *Петух Н.Н., Благодарев В.А.* Схемотехника парирования воздействия одиночных и дозовых эффектов в бортовых ретрансляторах // Труды МАИ. 2020. № 11. С. 11–32.
2. РД 134-0139 — 2005. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по перемежающимся и катастрофическим отказам. М.: ЦНИИмаш, 2005.
3. ГОСТ 25645.204 — 1983. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Методика расчета экранированности точек внутри фантома. М: Издательство стандартов, 1984.
4. ОСТ 134-1034 — 2012. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование КА. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры КА к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. РАКА. М.: ЦНИИмаш, 2012.
5. *Гильванов А.Б., Петухов П.Р., Чеберяка А.С.* Программа расчета поглощенных доз методом Монте-Карло // IEEE Конференция по космическому и ядерному воздействию. NSREC, Лас-Вегас, 2011.
6. *Pourrouquet P., Thomas J.C., Peyard P.F., Ecoj-fet R. and Rolland G.* «FASTRAD 3.2: Radiation Shielding Tool with a New Monte-Carlo Module», 2011 IEEE Radiation Effects Data Workshop 2011. P.1–5.
7. *Семенов В.Т., Луговский А.В., Коновалова Е.Д., Кожухов М.В.* Программный комплекс для расчета поглощенной дозы с учетом конструкции бортовой аппаратуры и компоновки космического аппарата // Материалы конференции «Иосифьянские чтения-2016» МО, Истра, АО «НИИЭМ» 2016. С. 103–104.
8. SSP 50094 Revision B — June 30, 2009 NASA/RSA Joint Specifications Standards Document for the ISS Russian Segment, Houston, Texas.
9. *Petersen E.* Single Event Effects in Aerospace // IEEE Press. 2011. 502 p.
10. *Кузнецов Н.В., Малыкин Ю.М., Николаева Н.И., Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Ужegov В.М., Яковлев М.В.* Программный комплекс COSRAD для прогнозирования радиационных условий на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. Вып. 2. С. 72–78.
11. Информационная система космической среды — www.spervis.oma.be