

# Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании

Сергей ПОЛЕСКИЙ, к. т. н.  
snr1981@yandex.ru  
Валерий ЖАДНОВ, к. т. н.  
jadnov@mitme.ru  
Майя АРТЮХОВА  
sightblinder@mail.ru  
Вячеслав ПРОХОРОВ

**Рассматриваются вопросы повышения достоверности и точности оценки радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов расчетными методами и проблемы оценки стойкости, связанные с применением в аппаратуре электронных компонентов иностранного производства, а также приводятся пути решения этих проблем.**

Первые космические аппараты (КА) функционировали всего в течение года. В настоящее же время стоит задача обеспечения сроков активного существования КА в течение 10–15 лет. Причина в том, что космические технологии широко вошли в жизнь общества, которое все сильнее зависит от эффективной работы различных космических систем: это и прогноз погоды, и разведка полезных ископаемых, и мониторинг окружающей среды, и развитие телекоммуникаций и телевидения, и, конечно же, обеспечение обороноспособности.

На функционирование бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) при ее эксплуатации влияют многочисленные факторы. Особое значение имеет воздействие полей ионизирующих излучений космического пространства. Применение полупроводниковых изделий микроэлектроники в качестве компонентной базы космических систем сделало актуальной задачу оценки и прогнозирования устойчивости компонентов и узлов к радиационным воздействиям космического пространства.

Широкое использование функционально сложных изделий в БРЭА КА, для которых практически невозможно провести весь комплекс работ по обеспечению требований по радиационной стойкости, проектирование электронных систем с использованием современных методов обработки информации, открытие новых радиационных эффектов вызывает ряд проблем при производстве относительно полной номенклатуры радиационно-стойких интегральных схем (ИС). Связано это с тем, что разработка ИС с повышенными показателями качества, в соответствии с действующими стандартами, требует значительных затрат. По этим причинам многие фирмы — производители ИС перестали выпускать радиационно-стойкие изделия, в то время как средства разработки

и отладки ИС коммерческих уровней качества широко представлены на рынке электронных компонентов.

Таким образом, в настоящее время наметилась тенденция применения коммерческих изделий микроэлектроники в БРЭА КА. Это дает ряд преимуществ по сравнению с радиационно-стойкими ИС, так как коммерческие ИС имеют большую информационную стойкость и меньше стоят.

Однако использование коммерческих ИС в БРЭА КА влечет некоторый риск. Связано это с тем, что некоторые коммерческие ИС неприменимы для условий эксплуатации в космосе, большинство имеет уровень функциональных отказов порядка 10 крад по суммарной накопленной дозе (то есть довольно низкий), стойкость не контролируется от партии к партии, а надежность в экстремальных условиях эксплуатации не определена.

Поэтому для коммерческих ИС приходится разрабатывать и проводить специальные процедуры входного и выходного контроля, а также, в ряде случаев, проводить дополнительные сертификационные испытания.

Достигнутый в настоящее время уровень разрешения технологии составляет около 0,032–0,045 мкм. Практически все современные тенденции по применению функционально сложных изделий микроэлектроники приводят к увеличению чувствительности ИС к воздействию радиации. Уменьшение размеров увеличивает вклад периферийных областей и снижает величину зарядов переключения. При этом также происходит уменьшение эффективной длины сбора заряда, что дает некоторую компенсацию эффекта уменьшения стойкости. Увеличение быстродействия приводит к тому, что при том же значении тока уменьшается заряд переключения. Использование пониженного напряжения или мощности потребления означает,

что требуется меньший заряд, необходимый для запоминания информации, и более низкие изменения пороговых напряжений, приводящих к параметрическим отказам. Имеет место и положительная тенденция в связи с применением новых технологических операций (за счет уменьшения толщины структур, снижения уровня дефектности исходных материалов, повышения уровней легирования и т.д.), вследствие чего происходит некоторое снижение чувствительности характеристик ИС к радиационным эффектам.

Сложная ситуация с одиночными сбоями, так как существенное сокращение размеров приводит к заметному снижению зарядов переключений. Так, заряд переключений для элементов современных динамических ОЗУ можно оценить на уровне 20–40 пКл и в диапазоне 0,2–0,5 пКл для статических ИС.

В околоземном и межпланетных пространствах КА подвергаются воздействию разнообразных факторов космоса.

Ионизирующее излучение (ИИ) состоит из потока первичных заряженных частиц (электроны, протоны и тяжелые заряженные частицы), а также вторичных частиц — продуктов ядерных превращений, связанных с первичными частицами. Основные эффекты воздействия ИИ на БРЭА обусловлены ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных частиц в чувствительных объемах элементов ИС. Эти эффекты проявляются через:

- параметрические отказы бортовой радиоэлектронной аппаратуры вследствие деградации характеристик ИС по мере накопления дозы ИИ;
- сбои и отказы ИС от воздействия отдельных высокоэнергетичных ядерных частиц.

На функционирование БРЭА КА воздействует много различных факторов, каждый из которых может вызвать сбой или отказ всей

системы. В общем случае необходимо принимать во внимание все действующие факторы. При этом роль тех или иных отказов в большой степени зависит от орбиты КА. В то же время вероятность возникновения эффектов при воздействии отдельных элементарных частиц и ядер атомов значительно увеличивается при нахождении КА в зоне южноатлантической аномалии и/или при возникновении мощных солнечных вспышек.

В таблице 1 приведены примеры некоторых наблюдаемых функциональных отказов КА [1, 2].

**Таблица 1.** Зафиксированные отказы и сбои в геостационарных КА

Название КА	Наблюдаемые сбои и отказы
DSCS-II	Сбросы в системе триггеров Отказ источника питания Сбои в цифровых схемах регулировки усиления
DSP	Деградикация системы терморегулирования Сигналы помех с датчика Сбои в системе управления
Intelsat III	Переключения в схемах управления системы стабилизации вращения
Intersat IV	Ошибочные операции в системе управления высотой
Telesat	Сбои в цифровых схемах телеметрии

Одним из ярких примеров потери КА из-за воздействия проникающей радиации является космический аппарат Telesat, запущенный 10 июля 1962 г. сразу же после проведения испытания ядерного оружия. Образовавшийся искусственный радиационный пояс Земли привел к существенному увеличению потоков электронов — почти на два порядка. Уже 24 ноября часть БРЭА КА начала функционировать неверно. Окончательно спутник потерял свою работоспособность в феврале 1963 г. При этом уровень радиационной стойкости электронной аппаратуры, определенный по результатам испытаний, составлял 0,6–2 Мрад. Этот образовавшийся искусственный радиационный пояс Земли явился причиной потери семи КА.

Резкое увеличение потоков ядерных частиц в момент мощной солнечной вспышки также может приводить к отказам и сбоям в БРЭА КА. Так, в момент солнечной вспышки, имевшей место 20 января 1994 г., произошли функциональные отказы электронной системы стабилизации канадского спутника связи Anik E-1 [3], а при солнечной вспышке в октябре 2003 г. отказал японский спутник ADEOS-II.

Но даже при относительно спокойной радиационной обстановке возникают сбои и отказы. Примером является схема КМОП оперативного запоминающего устройства NEC 64 К, которая широко использовалась в электронных узлах КА. В этой схеме наблюдалось в среднем 2,4 одиночного сбоя и 0,76 эффекта защелкивания за неделю [1].

Представленные примеры свидетельствуют о важности учета радиационных эффектов при разработке БРЭА, функционирующей в условиях воздействия факторов космического пространства.

С первых лет освоения космоса значительное внимание уделяется оценке радиационной обстановки в околоземном пространстве. Существующие модели построены на базе наборов данных, полученных с нескольких десятков спутников, тем самым обеспечивается широкий пространственно-временной охват [4–7]. Ни одна из существующих моделей не является полностью всеохватывающей вследствие того, что все области радиационного окружения непрерывно изменяются.

Модели, как правило, строятся при следующих предположениях:

- Потоки частиц представляются как всенаправленные (изотропные).
- Орбитальная интеграция представляется для различных высот и углов наклона.
- Данные по пространственному распределению заряженных частиц представляются обычно в координатах  $L$  и  $B$  ( $L$  — высота орбиты, нормированная на радиус Земли,  $B$  — напряженность магнитного поля).
- Интегральный поток  $\Phi(>E)$  представляет собой общий поток,  $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , при всех энергиях выше указанной пороговой энергии.
- Дифференциальный поток  $\phi(E)$  представляет собой скорость изменения потока от энергии для определенного уровня энергии,  $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{МэВ}^{-1}$ .
- Модели соответствуют конкретным промежуткам времени и поэтому относятся конкретно к условиям солнечного минимума или солнечного максимума.

Основными источниками ИИ в космическом пространстве являются:

- электроны и протоны радиационных поясов Земли;
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- галактические космические лучи (ГКЛ).

Уровень радиационных воздействий в каждой зоне зависит от толщины конструктивной защиты и параметров орбиты. Классификация БРЭА по ее размещению внутри КА приведена в таблице 2 в соответствии с ГОСТ РВ 20.39.305 [10].

ИИ космического пространства при воздействии на электронные компоненты (ЭК) вызывает дозовые эффекты как результат воздействия электронов и протонов (частицы

**Таблица 2.** Классификация бортовой аппаратуры по ее размещению внутри КА

Место расположения	Толщина защиты, мм
БРЭА, располагаемая внутри жилых отсеков КА	3–10
БРЭА, располагаемая внутри гермоконтейнера	1–2
БРЭА, располагаемая вне гермоконтейнера	0,3–1
БРЭА, располагаемая на внешней поверхности КА	0,1–0,2

низких энергий до 1 МэВ) и одиночные события радиационных эффектов как результат воздействия ГКЛ и СКЛ — тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и протонов (частицы относительно высоких энергий свыше 1 МэВ).

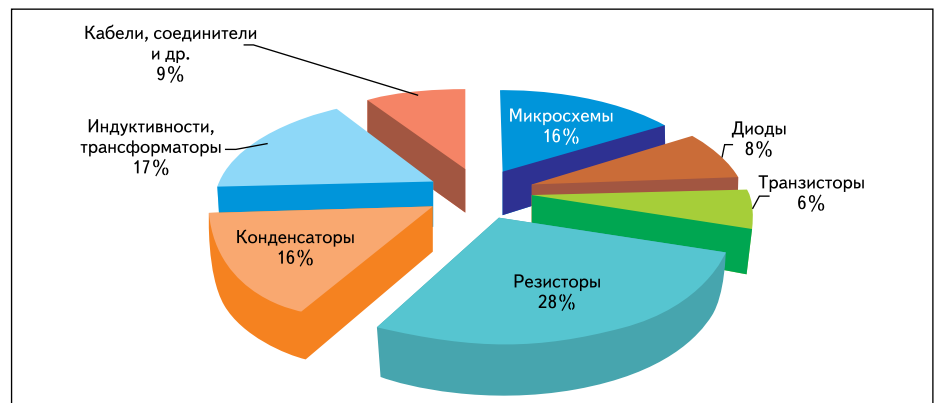
Влияние ИИ на БРЭА сводится к двум составляющим:

- к суммарной накопленной дозе радиации;
- к воздействию заряженных частиц, вызывающих одиночные сбои.

Мерой энергии, поглощенной в материалах электронных компонентов, является поглощенная доза, измеряющаяся в радах. Поглощенная доза, при которой наступает отказ ЭК, называется предельной накопленной дозой (ПНД) — это основная характеристика радиационной стойкости. Накопление дозы вызывает деградикацию параметров ЭК и полное прекращение функционирования.

Начиная с 1975 года было обнаружено большое число эффектов, вызываемых в изделиях электронной техники одиночными заряженными частицами космического пространства. В настоящее время эти эффекты являются одной из главных причин, ограничивающих стойкость радиоэлектронной аппаратуры на борту космического аппарата. В первом приближении все эффекты одиночных сбоев разделяют на 2 класса. К первому относятся:

- Обратимые (мягкие) сбои (Soft Errors), в том числе SEU (Single Event Upset); имеется возможность исправления этой ошибки программными методами без отключения питания аппаратуры.
- Переходные сбои в работе аналоговых и аналогово-цифровых ИС, обусловленные импульсом тока от попадания ТЗЧ или протона в какой-либо активный  $p$ - $n$ -переход ИС.



**Рис. 1.** Соотношение активных и пассивных ЭК в БРЭА

$$v_{БРЭА} = \sum_{i=1}^n n_{ЭРИi} \left( \int_{L_0}^{L_{\max}} \sigma_i(L) \varphi_{ТЗЧ}(L) dL + \int_{E_{op}}^{E_{\max}} \sigma_i(E) \varphi_p(E) dE \right) \quad (1)$$

$$v_{БРЭА}^T = \sum_{i=1}^n n_{ЭРИi} \left( \int_{L_0}^{L_{\max}} \sigma_i^T(L) \varphi_{ТЗЧ}(L) dL + \int_{E_{op}}^{E_{\max}} \sigma_i^T(E) \varphi_p(E) dE \right) \quad (2)$$

Ко второму классу относятся необратимые катастрофические отказы в функционировании ЭРИ:

- SEE (single event latch up — защелка).
- SEB (single event burnout) — пробой исток-области в мощных металл-окислах полупроводниковых транзисторов (МОПТ).
- SEGR (single event gate rupture) — пробой подзатворного диэлектрика в МОПТ.

Одиночным сбоям и катастрофическим отказам подвержены активные ЭК, так как они выполняются из полупроводниковых материалов. На рис. 1 приведено примерное соотношение активных и пассивных ЭК в БРЭА.

В России официальным документом по расчету оценки сбоев и отказоустойчивости является РД 134-0139 [8].

Расчетно-экспериментальный метод оценки стойкости БРЭА основан на расчете частоты сбоев БРЭА за счет действия заряженных частиц космического пространства и проводится по математической модели вида (1), где  $v_{БРЭА}$  — число сбоев в БРЭА в единицу времени,  $c^{-1}$ ;  $\varphi_{ТЗЧ}(L)$  — дифференциальный ЛПЭ-спектр плотности потока ТЗЧ,  $част \cdot см^{-2} \cdot c^{-1} \cdot МэВ^{-1} \cdot см^{-2} \cdot г$ ;  $\varphi_p(E)$  — дифференциальный энергетический спектр плотности потока протонов,  $част. см^{-2} \cdot c^{-1} \cdot МэВ^{-1}$ ;  $L_0$  — пороговое значение ЛПЭ,  $МэВ \cdot см^{-2} \cdot г^{-1}$ ;  $E_{op}$  — пороговое значение энергии протонов,  $МэВ$ ;  $L_{\max}$  — максимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ,  $МэВ \cdot см^{-2} \cdot г^{-1}$ ;  $E_{\max}$  — максимальное значение энергии протонов в спектре протонов,  $МэВ$ ;  $\sigma_i(L)$ ,  $\sigma_i(E)$  — зависимости сечений сбоев ЭРИ  $i$ -го типа от ЛПЭ ТЗЧ и энергии протонов соответственно,  $см^{-2}$ ;  $n_{ЭРИi}$  — количество ЭК  $i$ -го типа, примененных в БРЭА;  $n$  — число примененных в БРЭА типов ЭК с различными зависимостями  $\sigma_i(L)$ ,  $\sigma_i(E)$ .

Частота сбоев составных частей БРЭА вычисляется отдельно для ЗЧ СКЛ, ГКЛ и ЕРПЗ с учетом толщины защиты.

Частота возникновения возможных катастрофических отказов в БРЭА определяется по формуле (2), где  $v_{БРЭА}^T$  — частота возникновения возможных отказов БРЭА с учетом принятых мер по предотвращению отказов ЭК, чувствительных к одиночным отказам;  $\sigma_i^T(L)$ ,  $\sigma_i^T(E)$  — зависимость сечений возникновения одиночных отказов ЭК (тиристорный эффект, пробой) от ЛПЭ ТЗЧ и энергии протонов соответственно.

Вероятность возникновения катастрофического отказа в аппаратуре за счет действия тяжелых заряженных частиц космического пространства можно рассчитать по формуле:

$$P(t) = 1 - e^{-v_{БРЭА}^T t}, \quad (3)$$

где  $t$  — время, в течение которого БРЭА находится во включенном состоянии при установленном сроке активного существования КА [8].

На рис. 2 приведена проекция интегрального спектра высокоэнергетичных протонов (ВЭП) естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ) от высоты орбиты и толщины защиты для частиц с энергией, равной 10 МэВ.

Как видно на проекции, с увеличением высоты орбиты количество протонов увеличивается, а с увеличением толщины защиты, наоборот, уменьшается.

В [8] также приведены типовые значения параметров чувствительности ЭРИ к одиночным эффектам при воздействии заряженных частиц.

Оценка дозовых эффектов проводится в соответствии с ОСТ 134-1034 [9]. Стандарт развивает и дополняет основные положения и требования ГОСТ РВ 20.57.308 [11] в части методов испытаний и оценки стойкости БРЭА, приборов и оборудования КА к воздействию ИИ космического пространства по дозовым (необратимым параметрическим) эффектам и используется совместно с этим стандартом.

Расчет уровня стойкости БРЭА проводится поэлементным методом и заключается в сравнении уровня стойкости каждого типа ЭК с уровнем радиационного воздействия на него (поглощенных доз электронов, протонов и суммарной дозы), определенного расчетным путем. Результатом оценки является коэффициент запаса по радиационной стойкости  $K_3$ . Изделие имеет высокую предельную накопленную дозу, если  $K_3 \geq 3$  [9].

На рис. 3 приведена проекция накопленной дозы от высоты орбиты и толщины защиты за год.

С ростом высоты орбиты накопленная доза растет, а с увеличением толщины защиты — уменьшается, но есть исключения, например, существуют радиационные пояса Земли, где радиационный фон выше, чем вне их.

Рассмотрим пример расчета спецстойкости блока сбора служебной информации (БССИ), совершающего непрерывный мониторинг функционирования всех систем

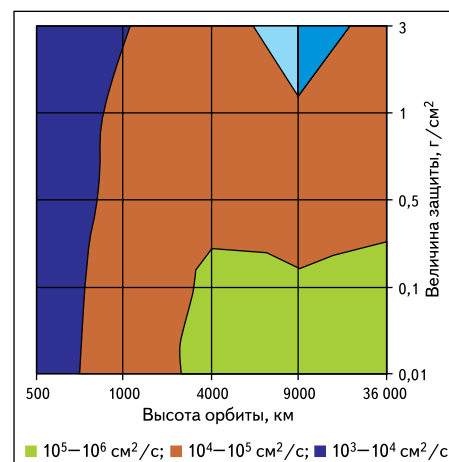


Рис. 2. Проекция интегрального спектра ВЭП ЕРПЗ от высоты орбиты и толщины защиты для частиц с энергией, равной 10 МэВ

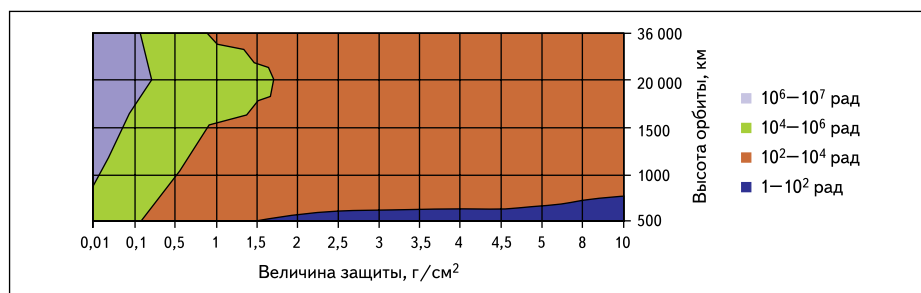


Рис. 3. Проекция накопленной дозы от высоты орбиты и толщины защиты за год

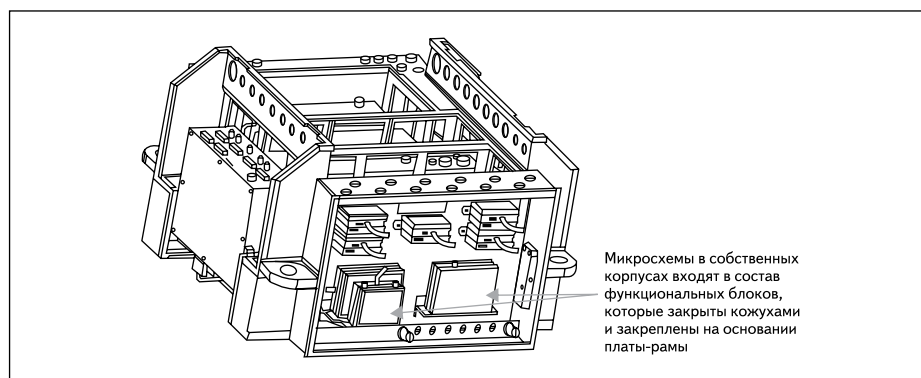


Рис. 4. Эскиз конструкции блока БССИ

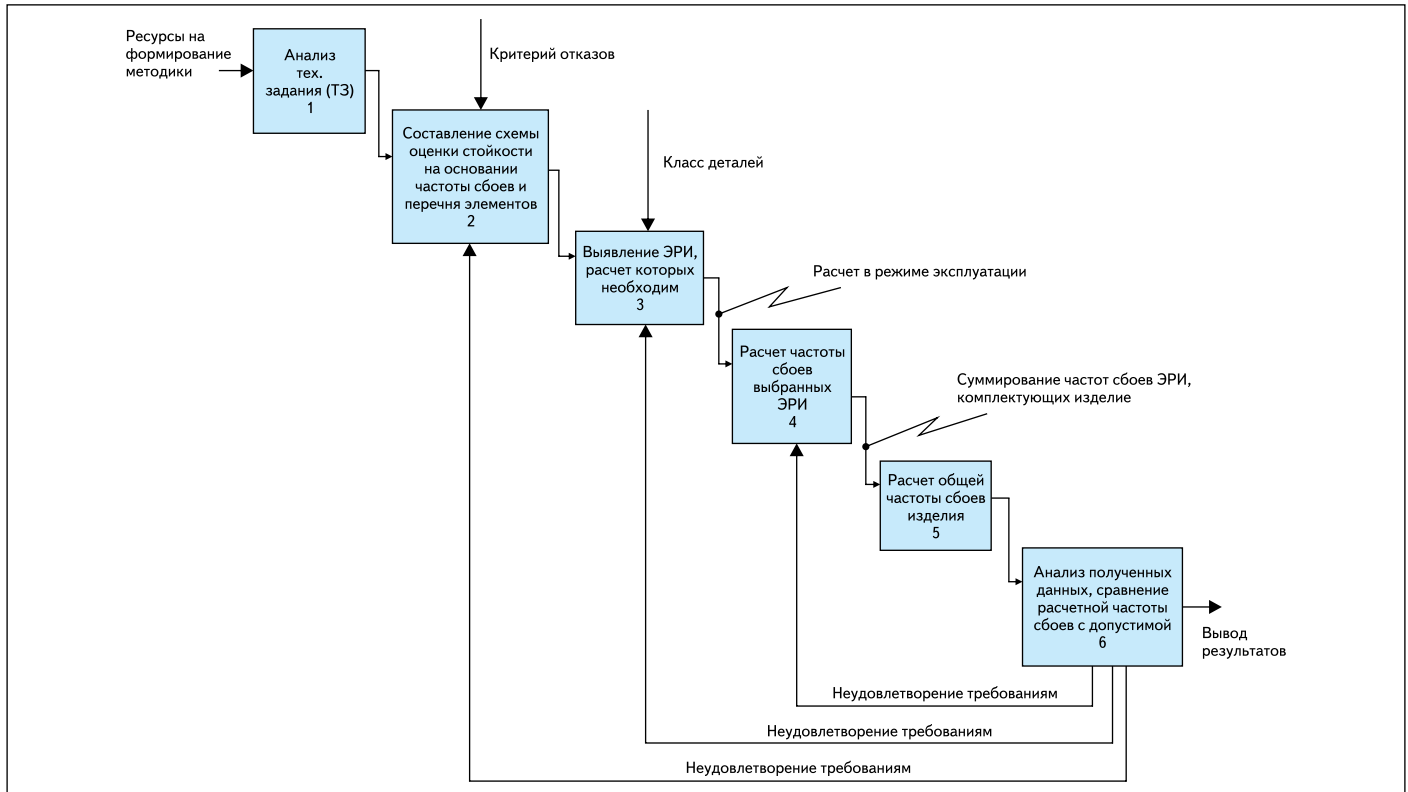


Рис. 5. Блок-схема алгоритма методики обеспечения спецстойкости ЭК

Таблица 3. Параметры, характеризующие стойкость ЭК (данные фирм-производителей)

Наименование ЭК	Функциональное назначение	Топологическая норма, мкм	Предельно накопленная доза, Крад	SEU, МэВ/см <sup>2</sup> (мг)	SEL, МэВ/см <sup>2</sup> (мг)	Сечение насыщения сбоев, см <sup>2</sup>
XQVR600-4CB228M	ПЛИС	0,22	100	Не чувствителен	125	Нет сведений
XQR18V04CC44M	ППЗУ (flash)	Нет сведений	30	120	120	Нет сведений
3DSD2G16VS4181-IS	Синхронное динамическое ОЗУ	Нет сведений	>80	2	$3 \times 10^{-11}$	
28LV011RP4FI-20	Электрически перепрограммируемое ПЗУ	Нет сведений	>100	>37 (режим чтения) 11,4 (режим записи)	>84	$3 \times 10^{-6}$ (режим чтения) $5 \times 10^{-3}$ (режим записи)
M3G2805S	Преобразователь DC/DC с входным фильтром	Нет сведений	>200	Нет сведений		
INGT 165B	Передатчик Gigastar	Нет сведений				
0253 01.5 NRT3L	Вставка плавкая	1	Нет сведений			
HS9-26CLV32RH-8	Приемник RS422	1,2	300	Не чувствителен	100	Нет сведений

космического аппарата. Эскиз конструкции блока БССИ приведен на рис. 4.

Одна из главных особенностей блока в том, что наряду с отечественными ЭК в нем применены ЭК иностранного производства.

Задача оценки стойкости будет разделена на два этапа:

1. Расчет предельно допустимой накопленной дозы и расчет коэффициента запаса ( $K_3$ ).
2. Расчет вероятности возникновения одиночных сбоев и катастрофических отказов за время работы БРЭА.

Блок-схема алгоритма методики обеспечения спецстойкости ЭК блока сбора служебной информации приведена на рис. 5.

С отечественной элементной базой все относительно просто: вся необходимая информация по стойкости ЭК к спецфакторам приведена в специальных справочниках. Трудности начинаются, когда требуется оценить ЭК иностранного производства.

Так, для ЭК иностранного производства, использованных в блоке, вся информация

по стойкости, предоставляемая фирмами-производителями, сведена в таблицу 3.

Согласно модели защиты в виде «полубесконечной плоскости», уровень ИИ КП, воздействующий на БССИ, имеющий защиту  $1 \text{ г/см}^2$ , будет равен  $D_{\text{сумм}} = 2488 \text{ крад}$ . Полученные значения  $K_3$  приведены в таблице 4.

На рис. 6 приведена диаграмма значений  $K_3$  в соответствии с таблицей 4.

Судя по таблице 4 и рис. 6, все компоненты, на которые имеются параметры предельно накопленной дозы, имеют  $K_3$  много больше 3. Из этого следует, что в течение всего срока активного существования КА в них не должны возникнуть дозовые эффекты [9]. Чтобы оценить  $K_3$  у остальных компонентов, требуются либо данные фирм-производителей, либо испытания.

Оценить вероятность возникновения одиночного сбоя можно двумя путями:

- 1) По топологической норме. Общее правило: если  $L_0 \geq 0,25 \text{ мкм}$ , то считается, что из-

Таблица 4. Значения коэффициента запаса

Наименование ЭРИ	Функциональное назначение	$K_3$
XQVR600-4CB228M	ПЛИС	40,2
XQR18V04CC44M	ППЗУ (flash)	12,1
28LV011RP4FI-20	Электрически перепрограммируемое ПЗУ	40,2
M3G2805S	Преобразователь DC/DC с входным фильтром	80,4
HS9-26CLV32RH-8	Приемник RS422	120,6
3DSD2G16VS4181-IS	Синхронное динамическое ОЗУ	Нет сведений
INGT 165B	Передатчик Gigastar	Нет сведений
0253 01.5 NRT3L	Вставка плавкая	Нет сведений

делие не подвержено одиночным сбоям (впрочем, возможны исключения, так как существуют ИС и с большей  $L_0$ , подверженные одиночным сбоям).

- 2) По методике, приведенной в [8]. Отсутствие данных по топологической норме не позволяет использовать первый способ. Для использования методики [8] также не хватает параметров. Недостающие значения параметров можно заменить «типовыми», приведенными в приложении «Б» [8].

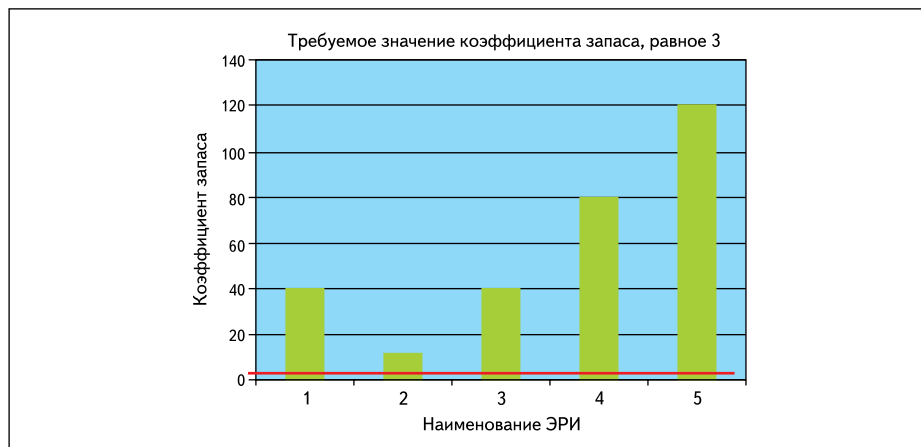


Рис. 6. Диаграмма значений КЗ: 1 — ПЛИС XQVR600-4CB228M; 2 — ППЗУ XQR18V04CC44M; 3 — ЭППЗУ 28LV011RP4FI-20; 4 — преобразователь DC/DC M3G2805S; 5 — приемник RS422 HS9-26CLV36RH-8

Однако данный вариант имеет один существенный минус. Продемонстрируем это на конкретном примере. Рассмотрим электрически перепрограммируемое ПЗУ (в информационных материалах фирмы-производителя на него приведены все параметры, необходимые для расчета частоты сбоев).

Проведем расчеты частоты возникновения одиночных сбоев по параметрам, предоставленным производителем, и по «типовым» параметрам, приведенным в приложении «Б» [8]. Исходные данные сведены в таблицу 5.

Для получения частоты сбоев перемножим значение сечения насыщения сбоев на корпус ИМС и значение интегрального спектра потока, соответствующее данной пороговой ЛПЭ сбоев за защитой с удельной плотностью в  $1 \text{ г/см}^2$ . Полученные значения частот для потока ГКЛ, среднего и максимального потока СКЛ приведены в таблице 6.

Как можно видеть, значения, полученные с использованием «типовых» параметров, отличаются более чем на 2 порядка от значений, полученных по параметрам фирмы-производителя, которые наиболее близки к истинным.

Таким образом, использование «типовых» значений параметров приложения «Б» [8] в оценке сбое- и отказоустойчивости представляется нецелесообразным, так как даст результаты, искажающие действительность. Другими словами, оценить стойкость расчетным методом ЭК иностранного производства с достаточной точностью при таком скудном объеме информации не представляется возможным без проведения эксперимента.

Подведем итог всего вышеизложенного. Обеспечение радиационной стойкости — одна из основных задач, стоящих перед космической промышленностью. Следовательно, проблема достоверной оценки стойкости на этапе проектирования космического аппарата — проблема первостепенной важности, причем не только в России, но и во всем мире. Существенное уменьшение объемов выпуска радиационно-стойкой компонентной базы и сокращение на рынке числа фирм-производителей таковой продукции привело к применению в космических аппаратах ЭК коммерческого уровня качества. Основная причина этого — экономическая: цена на коммерческую продукцию на 1–2 порядка ниже, чем на радиационно-стойкую.

Из-за несовершенства отечественной компонентной базы в России вынуждены применять в разработках ЭК иностранного производства. Зачастую на эти компоненты недостает показателей стойкости: практически полностью отсутствуют показатели энергии протонов, вызывающих одиночные сбои, очень редко в данных фирм-производителей есть сечение насыщения одиночных сбоев и катастрофических отказов. Топологическая норма, по которой можно приближенно оценить стойкость компонента, хотя и встречается в информационных материалах, которых много в Интернете, но они носят неофициальный характер. Чтобы получить достоверные данные, необходимо отправлять официальный запрос производителю. Иногда ожидание ответа на такие запросы превышает 6 месяцев, что приводит к существенному увеличению срока разработки БРЭА. Кроме того, некоторые фирмы просто не могут предоставить такую информацию, так как используют материалы, которые сами не производят, а покупают.

Оценка же стойкости ЭК иностранного производства с использованием «типовых» параметров дает не совсем корректные значения: они получаются либо завышенными (как в приведенном выше примере), либо заниженными. Причина этого в том, что коммерческая компонентная база постоянно обновляется: каждые полгода на рынке появляются новые типы ЭК, обладающие повышенными показателями стойкости.

Таким образом, из сложившейся ситуации существует три выхода:

1. Развитие и усовершенствование отечественной компонентной базы.
2. Кооперация зарубежных фирм — производителей компонентной базы с отечественными потребителями и создание доступной информационной базы, содержащей все необходимые параметры по стойкости ЭК.
3. Регулярное обновление значений «типовых» параметров в приложении «Б» [8].

Любой из трех вариантов требует определенных затрат. Но последние два направления сегодня представляются более перспективными, чем развитие практически безнадежно отставшей отечественной микроэлектронной промышленности, тем более что определенная кооперация между зарубежными производителями и отечественными потребителями уже существует.

## Литература

1. Ritter C. Spacecraft anomalies and future trends // 1996 IEEE NSREC IEEE Nuclear and Space Radiation Conference. Short Course: Radiation Effects Challenges for 21<sup>st</sup> Century Space Systems. Renaissance Esmeralda Resort Indian Wells, California. July 15, 1996.
2. Barrilot C. In-flight observed anomalies and failures. Short course // 3<sup>rd</sup> European Symposium. RADiation and their Effects on Components and Systems. RADECS 95. Arcachon, France. Cl. 18 Sept 1995.

Таблица 5. Параметры сбоев ЭК от воздействия тяжелых заряженных частиц

Источник данных	Группа ЭК	Типономинал ЭК	Количество задействованных битов	Сечение насыщения сбоев на бит (ТЗЧ), см <sup>2</sup> /бит		Сечение насыщения сбоев на микросхему (ТЗЧ), см <sup>2</sup>		Пороговая ЛПЭ сбоев, МэВ/(г/см <sup>2</sup> )	
				min	max	min	max	min	max
Данные производителя	Электрически перепрограммируемое ПЗУ	28LV011RP4FI-20	1 024 000	$3 \times 10^{-6}$ (чтение)	$5 \times 10^{-3}$ (запись)	3,072	5120	37 (чтение)	11,4 (запись)
Типовые параметры	Электрически перепрограммируемое ПЗУ	28LV011RP4FI-20	1 024 000	$10^{-11}$	$10^{-9}$	$1,024 \times 10^{-5}$	$1,024 \times 10^{-3}$	5	20

Таблица 6. Частота сбоев ЭК от воздействия тяжелых заряженных частиц

Группа ЭК	Типономинал ЭК	Частота сбоев от ТЗЧ ГКЛ, с <sup>-1</sup>		Частота сбоев от максимальной плотности потока ТЗЧ СКЛ, с <sup>-1</sup>		Частота сбоев от средней плотности потока ТЗЧ СКЛ, с <sup>-1</sup>		Суммарная частота сбоев, с <sup>-1</sup>	
		min	max	min	max	min	max	min	max
Электрически перепрограммируемое ПЗУ	28LV011RP4FI-20	$4,49 \times 10^{-10}$ (чтение)	$5,79 \times 10^{-3}$ (запись)	$3,23 \times 10^{-4}$ (чтение)	$1,11 \times 10^2$ (запись)	$4,06 \times 10^{-8}$ (чтение)	$1,37 \times 10^{-2}$ (запись)	$3,23 \times 10^{-4}$ (чтение)	$1,11 \times 10^2$ (запись)
Электрически перепрограммируемое ПЗУ	28LV011RP4FI-20	$1,19 \times 10^{-10}$	$2,53 \times 10^{-10}$	$2,46 \times 10^{-6}$	$4,99 \times 10^{-6}$	$2,86 \times 10^{-10}$	$6,27 \times 10^{-10}$	$2,46 \times 10^{-6}$	$4,99 \times 10^{-6}$

3. Dooling D. Stormy weather in space // IEEE Spectrum. 1996. № 6.
4. ГОСТ 25645.106-84. Пояса Земли градиационные естественные. Термины и определения. Госкомитет СССР по стандартам. 1984.
5. ГОСТ 25645.150-90. Лучи космические галактические. Модель изменения потоков частиц. Госкомитет СССР по стандартам. 1991.
6. Тверской Б. А. Ускорение и замедление частиц в межпланетной среде. М.: Просвещение, 1971.
7. Barth J. Applying modeling space radiation environments // 1997 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects. Short Course. Applying Computer Simulation Tools to Radiation Effects Problems. Snowmass Conference Center. Snowmass Village, Colorado. 21 July 1997.
8. РД 134-0139-2005. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам.
9. ОСТ 134-1034-2003. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.
10. ГОСТ РВ 20.39.305-97. Требования по стойкости к воздействию СФ.
11. ГОСТ РВ 20.57.308-97. Методы оценки стойкости к воздействию СФ.