

Методы контроля стойкости специализированных СБИС к естественным ионизирующим излучениям космического пространства

В.С. Анашин¹, В.Н. Улимов², И.О. Иштугин¹, В.В. Емельянов²

¹ОАО "Научно-исследовательский институт космического приборостроения",

²ФГУП "Научно-исследовательский институт приборов", npk1-niikp@mail.ru

Аннотация — В статье приводится порядок контроля (испытаний и оценки) стойкости к ионизирующим излучениям космического пространства (ИИ КП) электронной компонентной базы (ЭКБ), предназначенной для космических применений, рассмотрены испытательные средства для фиксации одиночных эффектов, созданные ОАО "НИИ КП".

Ключевые слова — ионизирующее излучение космического пространства, электронная компонентная база, методы контроля, дозовые эффекты, одиночные эффекты, испытательные стенды.

(в первую очередь, электростатических) типов отказов.

С уменьшением проектных норм ЭКБ чувствительность ЭКБ к ОЭ возрастает. Классификация ОЭ, проявляющихся в сбоях и отказах ЭКБ, приведена в таблице 1, первые два типа являются наиболее значимыми.

Таблица 1

Классификация ОЭ

№	ОЭ	Характеристика ОЭ	Характер отказа
1	SEU (Single Event Upset)	Инвертирование логического состояния бистабильных полупроводниковых структур.	Обратимый
2	SEL (Single Event Latchup)	Возбуждение паразитных тиристорных полупроводниковых структур.	Катастрофический (обратимый)
3	SEHE (Single Event Hard Error)	Одиночный микродозовый эффект, связанный с локальным выделением энергии.	Катастрофический
4	SEFI (Single Event Functional Interrupt)	Одиночный эффект функционального прерывания.	Обратимый
5	SEB (Single Event Burnout)	Одиночный эффект вторичного пробоя в мощных МДП-транзисторах.	Катастрофический
6	SEGR (Single Event Gate Rapture)	Одиночный эффект пробоя подзатворного диэлектрика в МДП-структурах.	Катастрофический
7	SET (Single	Переходная иониза-	Обратимый

I. ВВЕДЕНИЕ

Анализ динамики развития спутниковых систем в последнее десятилетие позволяет выявить их основные тенденции: снижение удельной стоимости информации, увеличение функциональной сложности, увеличение срока активного существования (САС) космических аппаратов (КА). Это приводит к дополнительным требованиям к ЭКБ космического применения, – высокая функциональность должна сочетаться с высокой надежностью и стойкостью к дестабилизирующим факторам космического пространства (КП).

Ионизирующие излучения являются главенствующим естественным фактором КП, ограничивающим САС радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) КА из-за воздействия на ЭКБ и проявляющимся в одиночных и дозовых эффектах (ОЭ и ДЭ). ДЭ от воздействия протонов и электронов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ) приводят к параметрическим и функциональным отказам, ОЭ от воздействия протонов и ионов ЕРПЗ, солнечных и галактических космических лучей (СКЛ и ГКЛ) приводят к обратимым (сбоям) и необратимым (катастрофическим) отказам. На долю ИИ КП падает, по литературным данным, от 30 до 50% квалифицированных отказов [1], хотя реально этот процент выше из-за того, что вызываемая деградация материалов является стимулятором других

Event Transient)	ционная реакция.	
---------------------	------------------	--

II. ПОРЯДОК КОНТРОЛЯ СТОЙКОСТИ ЭКБ К ИИ КП

Проверка соответствия характеристик стойкости ЭКБ к воздействию ИИ КП требованиям технического задания (ТЗ) на КА осуществляется при сертификации КА, – обязательной процедуре, без которой запуск КА невозможен. Сертификация – длительный процесс, реализуемый уполномоченными организациями в рамках всех этапов создания КА, включающий, с точки зрения стойкости к ИИ КП, проверку корректности требований ТЗ, проверку результативности специальных мероприятий обеспечения стойкости и т.п. На уровне ЭКБ сертификация заключается в подтверждении соответствия характеристик стойкости ЭКБ (полученных по результатам испытаний и расчетно-экспериментальных оценок) локальным условиям ее эксплуатации (рассчитываются из требований ТЗ с учетом особенностей конкретного места расположения в объеме КА).

$$P_{\text{л}} \leq P_{\text{ЭКБ}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{л}}$ – значение параметра стойкости в конкретных условиях применения конкретного КА;

$P_{\text{ЭКБ}}$ – подтвержденное значение параметра стойкости ЭКБ.

Применение ЭКБ в РЭА КА возможно только при выполнении неравенства (1), при этом:

$$P_{\text{ЭКБ}} = K_3 \cdot K_{\text{тм}} \cdot P,$$

где P – значение параметра стойкости (полученного с использованием аналитических или специальных методов);

$K_{\text{тм}}$ – коэффициент, учитывающий точность метода;

K_3 – коэффициент запаса.

Действующая нормативная документация позволяет использовать минимальный запас ($K_3 = 1$) только при использовании характеристик стойкости ЭКБ, полученных при испытаниях, по согласованным с Роскосмосом методам, на метрологически аттестованных моделирующих установках; в других случаях этот коэффициент может достигать 10 и выше. Этот подход реализуется и в нормативных документах Межведомственного центра радиационных испытаний ЭКБ, создаваемого в настоящее время предприятиями и организациями Росатома, Роскосмоса, Минпромторга и Министерства обороны.

Данная позиция не отрицает возможности применения и других методов, в т.ч. с использованием имитирующих установок и аналитических расчетов, а лишь уточняет их область применения: настройки методов испытаний на моделирующих установках, обеспечение стойкости ЭКБ в процессе ее производства, экспериментально-аналитические исследования стойкости ЭКБ и т.п.

В настоящее время существует ряд испытательных стендов, удовлетворяющих заявленным требованиям:

- испытательный стенд облучения высокоэнергетическими протонами и ионами (ИС ОПИ разработки ОАО "НИИ КП") с использованием вывода 212 ускорительного комплекса (УК) ГНЦ РФ ИТЭФ (медленный вывод);

- испытательный стенд облучения высокоэнергетическими протонами и ионами (ИС ОИ (400) разработки ОАО "НИИ КП") с использованием циклотрона У-400 ОИЯИ (г. Дубна);

- испытательный стенд (ФГУП "НИИП") с использованием вывода 213 высокоэнергетических протонов и ионов ускорителя У-10 УК ГНЦ РФ ИТЭФ;

- радиационные моделирующие установки ФГУП "НИИП" ГУ-200, "Гамма-Н", "Агат" с источниками гамма-излучения Co^{60} для проведения квалификационных, определительных и сертификационных испытаний ЭКБ и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на стойкость к дозовым эффектам;

- испытательный стенд контроля дозовых эффектов ИС ДРЭ (разработка ОАО "НИИ КП") с использованием низкоинтенсивного гамма-излучения шахты-хранилища реактора НИЯУ "МИФИ" для отбраковки потенциально нестойких изделий ЭКБ и исследований (включая контроль индивидуальных характеристик ЭКБ) в области прогнозирования стойкости ЭКБ к ИИ КП.

Указанные испытательные стенды и установки имеют необходимое методическое и программное обеспечение и являются единственным оборудованием для проведения испытаний (контрольных (квалификационных), определительных и сертификационных) ЭКБ и РЭА на стойкость к естественным ИИ КП в области одиночных и дозовых эффектов.

Следует отметить, что, если испытательные средства контроля дозовых эффектов (в т.ч. и специфические, использующие низкую интенсивность облучения) существуют достаточно давно и обеспечивают необходимый объем испытаний, то средства обеспечения испытаний ЭКБ в области одиночных эффектов созданы лишь в 2009 году.

III. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СТОЙКОСТИ ЭКБ К ИИ КП

Испытательные средства контроля одиночных эффектов созданы с использованием передового мирового опыта в области ОЭ, как на уровне технических требований (наборы тяжелых заряженных частиц, их характеристики, методологическое и метрологическое обеспечение и т.п.), так и конкретных их реализаций в крупных исследовательских центрах США и Европы; вместе с тем в работах учтена специфика российской космической индустрии (требования ГОСТ, отрасле-

вых НДС Роскосмоса, Росатома и т.д.) и опыт развития ускорительной и реакторной техники организациями Росатома, Роскосмоса и смежных отраслей.

Гармонизация требований проведена не только по набору ионов, но и по типам вызываемых эффектов и соответственно энергетическим характеристикам (энергия, плотность потока, длительность пучка и т.п.), учтены также требования зарубежных стандартов по режимам (динамический или статический) и условиям (нормальные условия и предельная рабочая температура) испытаний.

Испытательные средства контроля одиночных эффектов в ЭКБ состоят из аппаратуры испытательных стендов, в общем случае включающей:

- оборудование моделирования воздействия высокоэнергетических частиц ИИ КП на ЭКБ с использованием исходных пучков, включая оборудование контроля характеристик пучков (исходных и действующих), оборудование наведения и манипу-

лирования (изменение характеристик) пучками, оборудование манипулирования (фиксация, позиционирование, поворот) объектами испытаний, контроль вторичных излучений и защита внешней среды от первичных и вторичных излучений (защиты, ловушки);

- оборудование смены типа ионов;
- оборудование контроля характеристик объекта (включая электрические и неэлектрические параметры);
- оборудование обеспечения процесса испытаний, включая обработку данных (рабочие места операторов и испытателей)

и комплекта нормативно-методического и программного обеспечения.

Основные характеристики испытательного стенда облучения протонами и ионами (ИС ОПИ) и испытательного стенда облучения ионами ИС ОИ(400) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики ИС ОПИ и ИС ОИ(400)

№ п/п	Наименование параметра	Характеристики ИС ОПИ	Характеристики ИС ОИ	Примечание
1	Ионы	Fe	Ne, Ar, Kr, Xe, (Bi)	Линейные потери энергии (ЛПЭ) ≈ 30, 6,15,40,65 (100)
1.1	Набор ионов			
1.2	Пробег в Si, мкм	≥ 30	≥ 30	Соответствие зарубежным стандартам
1.3	Энергия, МэВ/А	18– 150 (на мишени)	3 –6 (на мишени)	
1.4	Плотность потока, частиц/см ² х с	10 ² -10 ⁵ (средняя)	10 ² -10 ⁵ (средняя)	Более 10 ⁵ возможны множественные эффекты
1.5	Максимальная плотность потока, частиц /см ² х с	не приводит к мощности дозы > 10 ⁶ у.е./с(Si)		Исключение возможности проявления эффектов мощности дозы
1.6	Неравномерность, %	30% (на пятне 30 x 30 мм)	15% (на пятне 30 x 30 мм) 30% (на пятне 50 x 100 мм)	
2	Протоны			
2.1	Энергия, МэВ	100 – 400 МэВ	–	Понижение энергии до 25 МэВ осуществляется применением дополнительных экранов
2.2	Плотность потока, частиц /см ² х с	10 ⁵ -10 ⁸	–	
2.3	Максимальная плотность потока, частиц /см ² х с	не приводит к мощности дозы > 10 ⁶ у.е./с(Si)		Исключение возможности проявления эффектов мощности дозы
2.4	Неравномерность, %	30% (на пятне 30 x 30 мм)	–	
3	Угол поворота объекта	от 0 ⁰ до 90 ⁰ (дискретность 5 ⁰ , точность ± 1 ⁰)	от 0 ⁰ до 60 ⁰ (дискретность 5 ⁰ , точность ± 1 ⁰)	Подтверждается конструктивным исполнением

Нормативно-методическое обеспечение для использования с ИС ОИ(400) и ИС ОПИ включает [2]:

- РД 134-0175-2009 "Методы испытаний цифровых сверхбольших интегральных микросхем на воздействие отдельных высокоэнергетических протонов и тяжелых заряженных частиц космического пространства на ускорителях заряженных частиц";
- РД 134-0174-2009 "Методы расчета показателей стойкости интегральных микросхем к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам по результатам прямых испытаний на ускорителях заряженных частиц";
- набор программ и методик испытаний, технических описаний и инструкций по эксплуатации, при этом отраслевые нормативные документы согласованы более чем с 20 предприятиями Роскосмоса и смежных отраслей и переданы в отраслевой архив (ЦКБС ЦНИИмаш).

Программное обеспечение ОСОТ (Одиночные Сбои и Отказы) – программный комплекс, предназначенный для расчета норм испытаний, обработки результатов испытаний ЭКБ на стойкость к ИИ КП, расчета частоты сбоев ЭКБ под воздействием высокоэнергетических протонов и ТЗЧ ЕРПЗ, ГКЛ, СКЛ и моделирования радиационной обстановки на орбите отработано, прошло широкую верификацию и сдано в отраслевой фонд алгоритмов и программ (ФАП). Структура ПО ОСОТ приведена на рис.1.

Разработаны следующие модули ОСОТ [3]:

- Модуль расчёта условий эксплуатации (производит для заданной орбиты, времени запуска, активности солнечного цикла расчёт энергетических спектров протонов и ионов ГКЛ, СКЛ, ЕРПЗ, а также электронов ЕРПЗ);
- Модуль обработки экспериментальных данных (производит аппроксимацию 2-х типов):

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{sat} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{L-L_c}{W_0}\right)^\alpha\right) \right], & L > L_c \\ 0, & L < L_c \end{cases}$$

$$\sigma = \sigma_{sat} \exp\left(-10 \frac{L_c}{L}\right)$$

- Модуль 4-параметрического расчёта интенсивности сбоев;

$$R = (S_0 / 4) \int_0^{S_{max}} ds f(s) \int_{L_{min}}^{L_{max}} dL K(L, s, Q_c) \phi(L)$$

S_0 – площадь поверхности чувствительного объёма, $f(s)$ – функция распределения длин хорд,

S – длина хорды, L – ЛПЭ, $\phi(L)$ – дифференциальный спектр ЛПЭ;

$$K(L, s, Q_c; \alpha, W) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{L-L_c(\alpha/s)}{W}\right)^\alpha\right]$$

- Модуль 2-параметрического расчёта интенсивности сбоев производит расчёт по модели тонкого слоя.

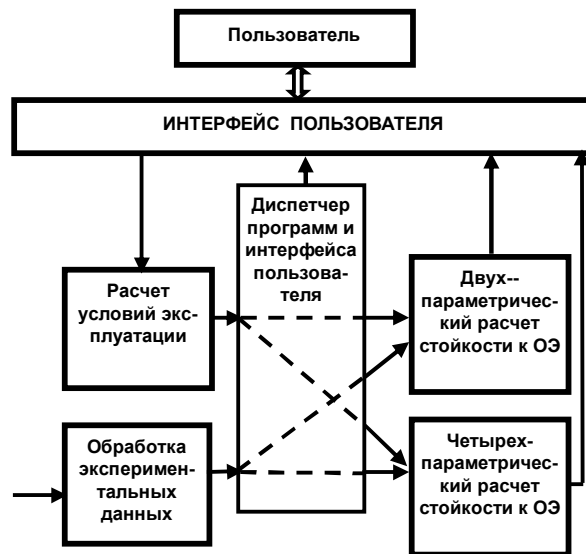


Рис. 1. Структура программного комплекса ОСОТ

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо отметить, что для уверенного применения ЭКБ в РЭА стойкость к ОЭ должна быть не менее 60 МэВ см²/мг (желательно выше 100 МэВ см²/мг, при меньших значениях требуется применение специализированных структурно-алгоритмических и конструктивно-технологических методов повышения стойкости), стойкость к ДЭ – не хуже 100 у.е. (желательно более 300 у.е), и эти значения должны быть подтверждены согласованными с Роскосмосом методами на метрологически аттестованных испытательных средствах (аппаратные комплексы с комплектом нормативно-методического и программного обеспечения), подобных приведенным в статье, при этом возможно использование минимальных значений коэффициентов запаса (≈ 1) к полученным характеристикам стойкости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Анашин В.С. Обеспечение высоких сроков активного существования космических аппаратов за счет контроля воздействия ионизирующих излучений космического пространства на радиоэлектронную аппаратуру // Двойные технологии. – 2009. - № 2.
- [2] Анашин В.С. Проблемы обеспечения высоких сроков активного существования бортовой радиоэлектронной аппаратуры спутниковой связи // Электросвязь. - 2009. - № 4.
- [3] Анашин В.С. Емельянов В.В., Каменский М.В. Озеров А.И., Титаренко Ю.Е. Результаты экспериментальной обработки испытательного стенда контроля одиночных радиационных эффектов в электронной компонентной базе на ускорителях протонов и ионов // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость. - 2009. Научно-технический сборник. – М.: МИФИ, 2009.