

## УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ МИКРОСХЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.К. Зольников<sup>1</sup>, Н.Г. Гамзатов<sup>2</sup>, И.И. Струков<sup>1</sup>, М.В. Солодилов<sup>1</sup>,  
Е.В. Грошева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова»

<sup>2</sup>АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон» (г. Москва)

<sup>3</sup>АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (г. Воронеж)

Рассматриваются вопросы создания современной микроэлектроники специального назначения и условия ее эксплуатации. Определены тенденции развития микросхем космического назначения и их влияния на радиационную стойкость. В работе приведены основные физические явления, доминирующие среди радиационных эффектов в последнее время. Уменьшение характерных размеров элементов СБИС приводит к появлению новых физических эффектов, для которых необходимо разрабатывать новые модели, или усовершенствовать существующие.

Ключевые слова: микросхема, радиационное воздействие, микроэлектроника, СБИС, космическое пространство.

## OPERATING CONDITIONS OF SPACE CHIPS

V.K. Zolnikov<sup>1</sup>, N.G. Gamzatov<sup>2</sup>, I.I. Strukov<sup>1</sup>, M.V. Solodilov<sup>1</sup>, E.V. Grosheva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

<sup>2</sup>Scientific research institute «Submicron»

<sup>3</sup>Scientific research institute electronic engineering

The issues of creating modern microelectronics for special purposes and the conditions of its operation are considered. The trends in the development of space-purpose microcircuits and their influence on radiation resistance are determined. The paper presents the main physical phenomena that dominate among the radiation effects in recent years. Reducing the characteristic sizes of VLSI elements leads to the appearance of new physical effects, for which it is necessary to develop new models, or improve existing ones.

Keywords: microcircuit, radiation exposure, microelectronics, VLSI, outer space.

Электроны и протоны естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ) совместно с геокосмическими лучами (ГКЛ) и солнечными космическими лучами (СКЛ), являются главенствующим естественным дестабилизирующим фактором космического пространства (КП), ограничивающим сроком активного существования (САС) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА). Воздействие ионизирующего излучения (ИИ) проявляется в виде одиночных (воздействие протонов ЕРПЗ, СКЛ и ГКЛ, тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) СКЛ и ГКЛ) и дозовых эффектов (воздействие электронов ЕРПЗ, протонов ЕРПЗ и СКЛ), на долю которых приходится до 50% всех квалифицированных отказов, при этом, на прямое и стимулирующее (вызванные воздействием ИИ КП электростатические эффекты) радиационное воздействие приходится до 70% отказов [1, 2]. По данным отчета Кунса и др. [1] в период с 1993 по 1999 гг наблюдались аномалии – более 200 сбоев и отказов, в том числе прекращение миссий – зарубежных КА, вызванные воздействием ИИ КП. По материалам [1-14] в 2005 – 2010 гг наблюдались аномалии (более 50 сбоев и отказов) в работе РЭА российских КА (Глонасс, Экспресс, Коспас и др.), вызванные воздействием ИИ КП. По данным группы управления космических научных миссий [2] 59% всех космических миссий испытало воздействие возмущений «космической погоды». Поэтому задание требований по стойкости ЭКБ и РЭА к воздействию ИИ КП и их подтверждение является важнейшей задачей при разработке космической техники. При этом, требования к ЭКБ и РЭА напрямую зависят от их условий функционирования, которые определяются по моделям потоков заряженных частиц: электронов и протонов ЕРПЗ, протонов и ТЗЧ СКЛ и ГКЛ.

В настоящее время существует несколько эмпирических моделей потоков электронов ЕРПЗ (GPS, GSO [4], IGE 2006, AE8, MEOv2 [5, 6]) и протонов ЕРПЗ (CRRES, SAMPEX, NPOES [4], AP8 [5, 6]), которые основываются на данных отдельных спутников или группы спутников, функционирующих на близких орбитах.

В России аналогом официальных и наиболее широко используемых моделей AE-8, AP-8, являются модели [7], разработанные в НИИЯФ МГУ.

Так же, как и модели AE8, AP8, модели НИИЯФ МГУ преимущественно основаны на экспериментальных данных, полученных до середины 70-х годов, однако содержат некоторые уточнения, внесенные благодаря использованию результатов отечественных и зарубежных экспериментов, выполненных в 1975-1985 году.

В качестве международного стандарта [5, 6, 8], потоков частиц ГКЛ принята полуэмпирическая модель ГКЛ, разработанная в НИИЯФ МГУ [9].

За рубежом наибольшее распространение получили эмпирические модели потоков частиц СКЛ JPL-91 [10], Кинга [11] и ESP [5, 6, 12, 13], CREME96 [5, 6]. В России используется вероятностная количественная модель СКЛ разработки НИИЯФ МГУ [14].

Нормативным документом, в котором реализованы российские модели потоков заряженных частиц ЕРПЗ, СКЛ и ГКЛ, является ОСТ 134-1044-2007 [16]. Согласно данному нормативному документу, были рассчитаны условия функционирования КА в части ИИ КП на различных типовых орбитах.

Результаты расчета суммарных поглощенных доз электронов и протонов ЕРПЗ, протонов СКЛ на различных типовых орбитах в диапазоне от 400 до 36000 км за срок активного существования (САС) 10 лет (типовой САС) для типовых форм защиты (полуплоскость, полусфера) и типовых толщин защиты (0,01; 0,1; 0,5; 1,0; 3,0; 10,0 г/см<sup>2</sup>) позволяют сделать выводы:

- значения суммарных поглощенных доз на борту КА существенно зависят от высоты его орбиты, от толщины и формы защиты;

- наиболее сильная зависимость значений поглощенной дозы от высоты орбиты КА наблюдается на высотах в пределах от 400 до 3000 км. Разница в значениях поглощенных доз в этом диапазоне высоты орбиты составляет более двух порядков. В диапазоне высот орбит от 3000 до 15000 км эта разница составляет менее порядка при толщинах защиты в диапазоне от 0,01 до 1,0 г/см<sup>2</sup>, а за толщинами защиты в диапазоне от 3,0 до 10,0 г/см<sup>2</sup> эта разница возрастает почти на два порядка;

- с увеличением толщины защиты ее эффективность снижается. Например, при увеличении толщины защиты от 1 г/см<sup>2</sup> до 3 г/см<sup>2</sup> поглощенная доза уменьшается более чем 58 раз, а при увеличении толщины защиты от 3 г/см<sup>2</sup> до 10 г/см<sup>2</sup> - только в 5,8 раз;

- уровень дозовых нагрузок на ЭКБ и РЭА КА за типовыми толщинами защиты высокий: за защитой 0,5 г/см<sup>2</sup> (типовая защита варианта бесконтейнерного монтажа составных частей аппаратуры) максимальные поглощенные дозы составляют от 850 крад (на высоте орбиты 20000 км при модели защиты в виде полуплоскости) до 2,5 Мрад (при модели защиты в виде полусферы), а за защитой 1 г/см<sup>2</sup> (типовая защита при контейнерном монтаже аппаратуры) от 100 крад (на высоте 15000 км при модели защиты в виде полуплоскости) до 700 крад (при модели защиты в виде полусферы). При этом, даже за защитой

3 г/см<sup>2</sup> (толщина защиты с учетом использования конструктивных методов защиты и применения дополнительных защитных экранов) поглощенные дозы составляют от 55 крад до 100 крад (на высоте 3000 км).

#### Список литературы

1. Автоматизация управления и проектирования в электронной промышленности : монография / Ю.К. Фортинский, В.Е. Межов, В.К. Зольников, П.П. Куцько. – Воронеж: ВГУ, 2008. – 275 с.

2. Анциферова, В.И. Анализ подготовки специалистов по радиоэлектронике для научно-производственных и коммерческих структур в современных условиях / В.И. Анциферова, В.К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2009. – № 3-4. – С. 5-12.

3. Меерсон, В.Э. Моделирование потоков заряженных частиц космического пространства / В.Э. Меерсон, С.С. Веневитина, Е.Д. Богачева // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 32-39.

4. Меерсон, В.Э. Модели прохождения заряженных частиц космического пространства через защиту космической аппаратуры / В.Э. Меерсон, С.С. Веневитина, Г.В. Киселев // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 40-48.

5. Архитектура нейропроцессоров для систем автоматического управления подвижными объектами / В.М. Антимиров, В.К. Зольников, В.В. Лавлинский [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 4-10.

6. Анализ проблем моделирования элементов КМОП БИС / В.К. Зольников, С.А. Евдокимова, А.В. Фомичев [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 20-25.

7. Схемотехнический базис и проверка микросхем на работоспособность / В.К. Зольников, С.А. Евдокимова, А.В. Фомичев [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 25-30.

8. Ягодкин, А.С. Современные САПР для электронной компонентной базы космического назначения / А.С. Ягодкин // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 92-97.

9. Результаты исследований ультрабыстрых выпрямительных диодов при воздействии радиации / В.К. Зольников, А.И. Яньков, А.Ю. Кулай [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 42-47.

10. Исследование линейных стабилизаторов напряжения на стойкость к воздействию специальных факторов / В.К. Зольников, А.И. Яньков, К.А. Чубур [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 48-53.

11. Кононов, В.С. Накристалльное резервирование блоков АЦП и ЦАП специального назначения / В.С. Кононов // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 53-58.

12. Создание тестового окружения и порядок загрузки тестов в процессе проектирования микросхем / К.А. Чубур, А.Ю. Кулай, А.Л. Савченко [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 1. – С. 83-87.

13. Разработка материалов и радиационно-стойкой ЭКБ на основе КНС/КНИ структур / И.И. Струков, С.В. Гречаный, А.С. Ягодкин, А.Н. Черников // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 72-76.

14. Особенности технологического процесса изготовления микросхем космического назначения по технологии КМОП КНС / В.К. Зольников, С.А. Евдокимова, И.В. Журавлева, Е.А. Маклакова, А.А. Илунина // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 53-58.