

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ МИКРОСХЕМАХ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Д.Б. Иванищенко¹, С.А. Сазонова¹, Салма Актер¹, А.И. Заревич¹, А.С. Грошев¹

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. Статья посвящена созданию радиационно-стойких библиотек элементов для криптографических микросхем, применяемых в космической аппаратуре. Рассмотрены основные этапы разработки, включая анализ внешней радиационной обстановки, выбор конструктивных решений и внедрение средств автоматизации проектирования. Подчеркивается важность комплексного подхода к повышению стойкости изделий.

Ключевые слова: библиотеки элементов, радиационная стойкость, криптографические микросхемы, информационная система.

SIMULATION OF RADIATION EFFECTS IN CRYPTOGRAPHIC CHIPS FOR SPACE APPLICATIONS

D.B. Ivanishchenko¹, S.A. Sazonova¹, Salma Akter¹, A.I. Zarevich¹, A.S. Groshev¹

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. This article focuses on the development of radiation-hardened libraries of elements for cryptographic microcircuits used in space equipment. The main stages of development are considered, including analysis of external radiation conditions, selection of structural solutions, and implementation of automated design tools. The importance of a comprehensive approach to improving the radiation resistance of devices is emphasized.

Keywords: libraries of elements, radiation resistance, cryptographic chips, information system.

Введение

Развитие технологий микроэлектроники привело к созданию сверхбольших интегральных схем (СБИС) с высокой степенью интеграции, которые широко применяются в различных областях, включая космическую технику. Однако эксплуатация таких устройств в условиях космоса сопряжена с рядом проблем, связанных с воздействием ионизирующего излучения.

Одним из наиболее опасных факторов являются одиночные события (ОС), вызываемые взаимодействием отдельных ядерных частиц с активными областями полупроводниковых структур. Эти эффекты могут привести к временным отказам или даже катастрофическим сбоям в работе микросхем. Особенно актуальна эта проблема для криптографических микросхем, где надежность и безопасность данных имеют первостепенное значение.

Для решения задачи повышения радиационной стойкости необходимо провести детальный анализ физических процессов, происходящих при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), а также разработать эффективные методы моделирования этих явлений на различных уровнях проектирования. В данной статье описываются основные принципы создания математических моделей и алгоритмов расчета параметров ОС, позволяющих спрогнозировать поведение микросхем в условиях космического излучения.

Физические основы одиночных событий

Одиночные события возникают вследствие взаимодействия одной ядерной частицы с чувствительным объемом элемента микросхемы. Главной характеристикой, определяющей вероятность возникновения ОС, является линейные потери энергии (ЛПЭ). Они зависят от энергии частицы, её типа и свойств материала микросхемы. При попадании частицы в активную область формируется локальный заряд, который может вызвать переключение элемента из одного состояния в другое.

На рисунке 1 показана типичная зависимость сечения одиночных событий от ЛПЭ. Как видно из графика, сечение возрастает с увеличением ЛПЭ до определенного предела, после которого достигается насыщение.

Математическая модель распределения заряда в треке частицы может быть представлена следующим уравнением:

$$Q(t) = \int_0^t I_{ion}(t') dt',$$

где $I_{ion}(t)$ — ионизационный ток, возникающий в результате взаимодействия частицы с материалом микросхемы.

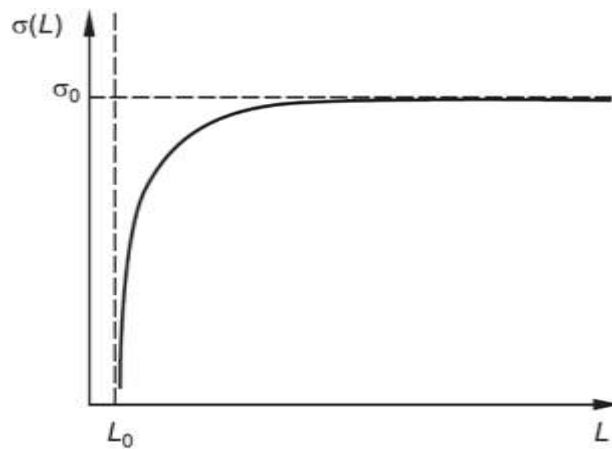


Рисунок 1 – Зависимость сечения одиночных событий σ от ЛПЭ L тяжелых заряженных частиц

Моделирование на функционально-логическом уровне

Моделирование на функционально-логическом уровне позволяет оценить влияние радиационных эффектов на работу микросхем без необходимости детального анализа каждого элемента. Для этого используются упрощенные модели "неисправных" элементов, которые учитывают изменение временных задержек при воздействии излучения.

Таблица 1 демонстрирует примерные значения временных задержек для различных уровней энергии ТЗЧ.

Таблица 1 – Зависимость временных задержек от энергии ТЗЧ

Энергия ТЗЧ, МэВ	Задержка, нс
10	5
20	10
30	15

Для реализации моделирования разработано специализированное программное обеспечение, которое включает несколько модулей: мониторинговый, расчетный и интерфейсный. Мониторинговый модуль координирует работу всех остальных компонентов системы, обеспечивая передачу данных между ними.

Расчетный модуль выполняет численное решение дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы, а интерфейсный модуль предоставляет пользователю удобный способ управления системой.

На рисунке 2 представлена структура САПР сквозного проектирования микросхем космического назначения и место в ней данной подсистемы, а на рисунке 3 – структура подсистемы расчета стойкости СБИС к факторам КП, где предусмотрены программные модели расчета параметров ОС.

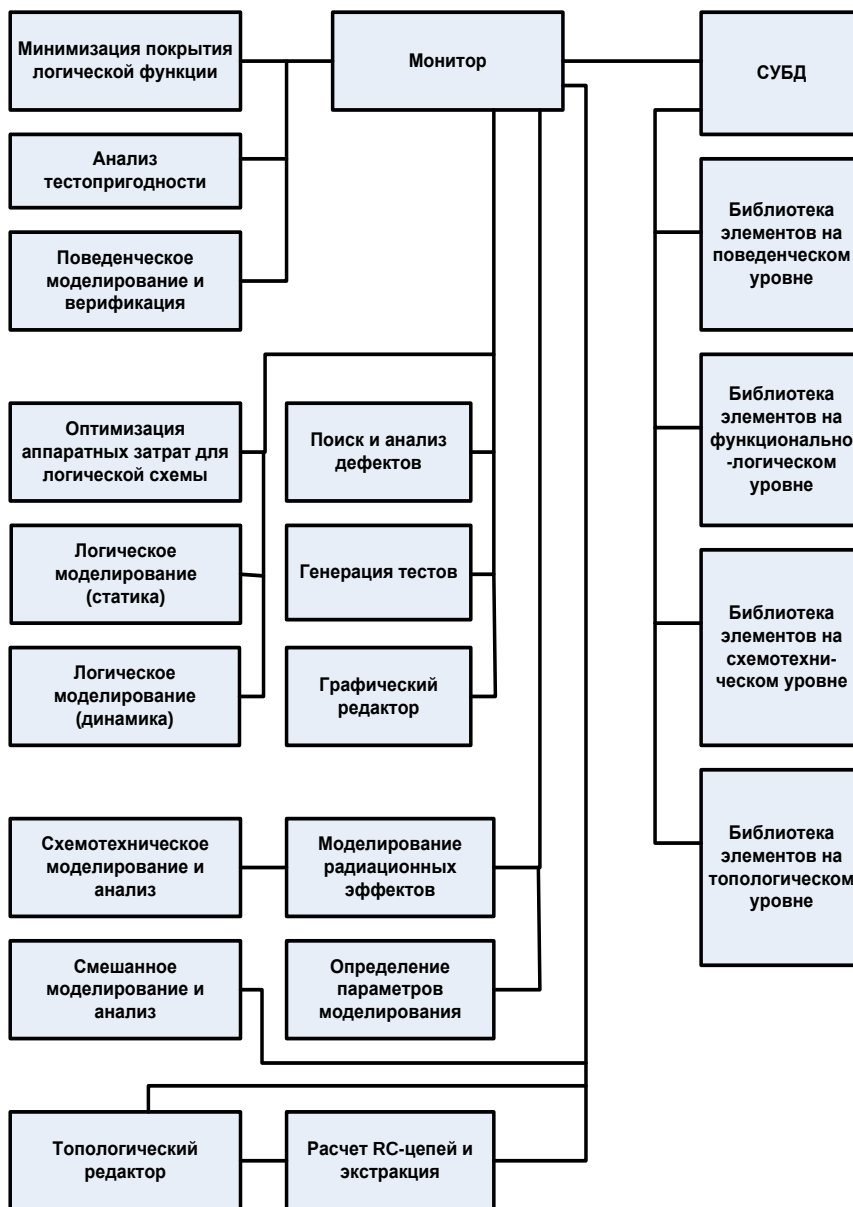


Рисунок 2 – Структура программных средств моделирования базовых элементов КМОП СБИС космического назначения

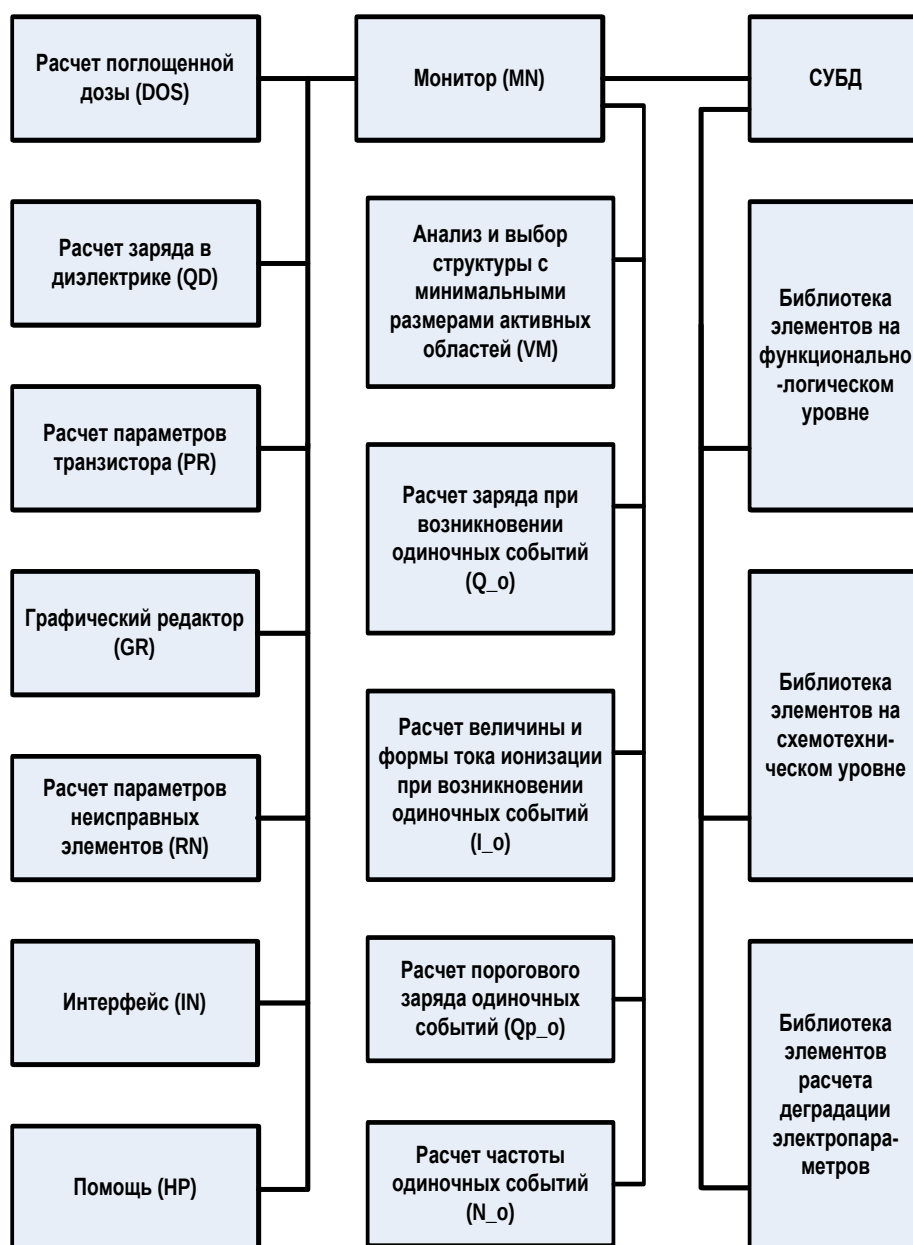


Рисунок 3 – Структура программного обеспечения расчета радиационных воздействий космического характера

Экспериментальные исследования подтвердили высокую точность предложенных моделей. Например, для микроконтроллера с адресуемой памятью $64K \times 8$ пороговое значение ЛПЭ по уровню бессбойной работы составило 30 МЭВ $\text{см}^2/\text{мг}$, что хорошо согласуется с теоретическими расчетами.

Заключение

Разработка методов моделирования радиационных эффектов в криптографических микросхемах является важной задачей для обеспечения их надежности в условиях космического излучения. Предложенные в статье подходы позволяют

эффективно оценивать вероятность возникновения одиночных событий и разрабатывать стратегии повышения радиационной стойкости. Дальнейшее развитие этих методов требует учета новых технологических решений и совершенствования существующих моделей.

Список литературы

1. Таперо, К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 304 с.
2. Таперо, К. И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники: учеб. пособие / К. И. Таперо, С. И. Диденко. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. – 349 с.
3. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / И. И. Алексеев [и др.]. — Электрон. дан. — Москва : Физматлит, 2013. — 256 с.
4. Полуэктов, А. В. Моделирование ослабления ионизирующего излучения за счет защитного корпуса микросхем / А. В. Полуэктов, Р. Ю. Медведев, А. И. Заревич // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 93-100. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-93-100. – EDN QQRQXE.
5. Повышение формализации задач верификации топологии и электрической схемы для систем автоматизированного проектирования / А. В. Полуэктов, К. В. Зольников, А. В. Ачкасов, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 102-111. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-102-111. – EDN QIKKRO.
6. Елифанов, Е. Н. Системный анализ акустических свойств речевых оповещателей / Е. Н. Елифанов, В. Ф. Асминин, С. А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 4. – С. 42-53. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-4-42-53. – EDN BMZBYL.
7. Полуэктов А.В., Макаренко Ф.В., Ягодкин А.С. Использование сторонних библиотек при написании программ для обработки статистических данных // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 33-41.
8. Калач, А. В. О возможностях применения метода почти-периодического анализа для обработки изображений / А. В. Калач, А. А. Парамонов, С. Л. Сахаров // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 44-52. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-42-50. – EDN HKBSAV.

References

1. Tapero, K. I. Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications / K.I. Tapero, V.N. Ulimov, A.M. Members. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2012. – 304 p.
2. Tapero, K. I. Fundamentals of radiation resistance of electronic equipment products: radiation effects in electronic equipment products: textbook. so-so / K. I. Tapero, S. I. Didenko. – M.: Ed. House of MISIS, 2013. – 349 p.
3. Ionizing radiation from outer space and their effects on the onboard equipment of spacecraft / I. I. Alekseev [et al.]. — Electron. dan. Moscow : Fizmatlit Publ., 2013. 256 p.
4. Poluektov, A. V. Modeling of attenuation of ionizing radiation due to the protective housing of microcircuits / A. V. Poluektov, R. Y. Medvedev, A. I. Zarevich // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – pp. 93-100. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-93-100. – EDN QQRQXE.
5. Increasing the formalization of topology and electrical circuit verification tasks for computer-aided design systems / A.V. Poluektov, K. V. Zolnikov, A.V. Achkasov, Yu.A. Chevychelov // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 1. – pp. 102-111. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-102-111. – EDN QIK-KRO.
6. Epifanov, E. N. System analysis of acoustic properties of speech annunciators / E. N. Epifanov, V. F. Asminin, S. A. Sazonova // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 4. – pp. 42-53. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-4-42-53. – EDN BMZBYL.
7. Poluektov A.V., Makarenko Ph.V., Yagodkin A.S. The use of third-party libraries when writing programs for processing statistical data // Modeling systems and processes. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – pp. 33-41.
8. Kalach, A. V. On the possibilities of using the method of near-periodic analysis for image processing / A. V. Kalach, A. A. Paramonov, S. L. Sakharov // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 3. – pp. 44-52. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-42-50. – EDN HKBSAV.