

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ

А.В. Шпинев, А.Н. Потапов

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

Аннотация: С постоянной миниатюризацией топологических норм и ростом степени интеграции современных микроконтроллеров и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) их уязвимость к воздействию ионизирующего излучения в космическом пространстве становится все более критичной. Особую опасность представляют тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) – высокоэнергетические ионы, способные при единичном попадании в чувствительный объем кристалла вызывать одиночные сбои, приводящие к нарушению функциональности или полному отказу электронных систем космических аппаратов.

Цель данной статьи – детально рассмотреть физические механизмы воздействия тяжелых заряженных частиц на полупроводниковые структуры, проанализировать природу одиночных сбоев и современные методы проектирования стойкой электронной компонентной базы. Особое внимание уделяется практическим аспектам применения специализированных систем автоматизированного проектирования (САПР), таких как Synplify Premier, для автоматического внедрения механизмов защиты на уровне комбинационных схем, конечных автоматов и блоков памяти.

Ключевые слова: тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ), одиночные сбои, радиационная стойкость, микроконтроллеры, ПЛИС, чувствительный объем, механизмы защиты, Synplify Premier, троирование, космическая электроника.

EFFECTS OF HEAVY CHARGED PARTICLES ON MICROCONTROLLERS

A.V. Spinev, A.N. Potapov

Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov

Abstract. With the constant miniaturization of topological standards and the increasing degree of integration of modern microcontrollers and programmable logic integrated circuits (FPGAs), their vulnerability to ionizing radiation in outer space is becoming increasingly critical. Heavy charged particles (HPPs), high-energy ions capable of causing single failures upon a single hit into a sensitive crystal volume, leading to a malfunction or complete failure of spacecraft electronic systems, are particularly dangerous.

The purpose of this article is to consider in detail the physical mechanisms of the effect of heavy charged particles on semiconductor structures, to analyze the nature of single failures and modern methods of designing a stable electronic component base. Special attention is paid to the practical aspects of using specialized computer-aided design (CAD) systems, such as Synplify Premier, for the automatic implementation of protection mechanisms at the level of combination circuits, finite automata and memory blocks.

Keywords: heavy charged particles, single failures, radiation resistance, microcontrollers, FPGA, sensitive volume, protection mechanisms, Synplify Premier, tethering, space electronics.

Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом

Тяжелые заряженные частицы теряют энергию при прохождении через вещество благодаря взаимодействию с атомами среды. К этой категории частиц относятся ядра всех стабильных элементов - от водорода (H) до урана. Основные каналы энергетических потерь включают:

1) Упругое рассеяние:

Сохранение суммарной кинетической энергии системы "налетающая частица + частица-мишень" до и после взаимодействия.

2) Возбуждение атомов (неупругое рассеяние):

Передача части энергии налетающей частицы электронам атома-мишени, что приводит к их переходу на более высокие энергетические уровни.

3) Ионизация атомов (неупругое рассеяние):

Полная передача энергии связи электрону, приводящая к его высвобождению из атома. Особый случай - образование δ -электронов, обладающих достаточной энергией для последующей ионизации соседних атомов.

4) Ядерные реакции:

Прямое взаимодействие с ядрами атомов, вызывающее их трансформацию в ядра других элементов с возможным выбросом вторичных ионизирующих частиц.

5) Другие каналы:

Каждый из этих механизмов вносит определенный вклад в общие энергетические потери тяжелых заряженных частиц при их прохождении через вещество.

Ключевые процессы взаимодействия: четыре случая ионизации, при которых частица посредством кулоновского взаимодействия выбивает электроны с атомов, расположенных вблизи ее траектории. Параллельно показан процесс возбуждения атома - электрон, получив порцию энергии, переходит на более высокий энергетический уровень, а затем возвращается в основное состояние, испуская фотон.

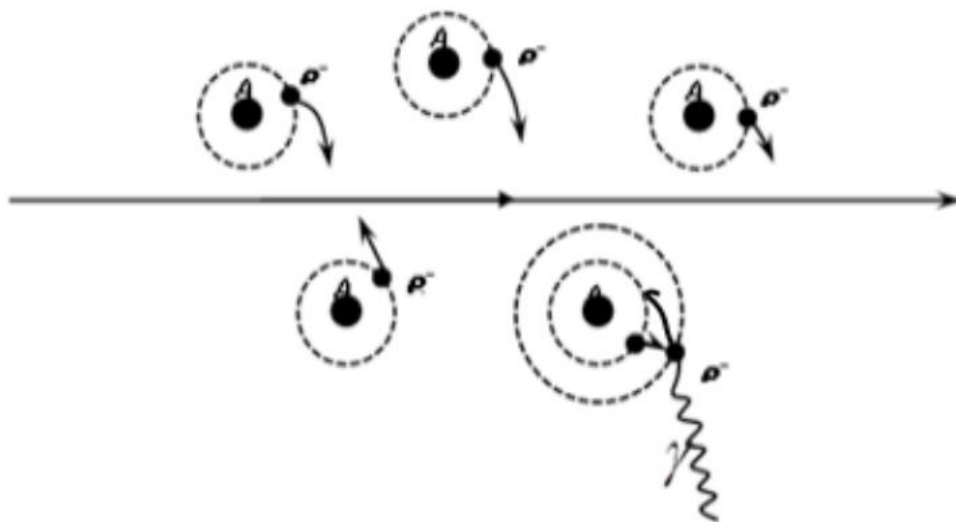


Рисунок 1 – Прохождение тяжелой положительно заряженной частицы через вещество

Основной механизм потерь энергии тяжелыми заряженными частицами обусловлен неупругими столкновениями, вызывающими возбуждение и ионизацию атомов среды. Характерной особенностью поведения таких частиц является их способность сохранять первоначальное направление движения, несмотря на многократное рассеяние. При этом распределение переданной энергии (дозы) по глубине вещества имеет характерную особенность - относительно равномерное распределение с резким увеличением вблизи точки остановки, формирующим выраженный максимум (пик Брэгга).

Важно отметить, что после достижения пика дозная кривая не обрывается резко, а постепенно снижается, образуя так называемый "хвост". Этот эффект, особенно выраженный для углерода, объясняется вторичными процессами, в частности излучением γ -квантов, возникающих в результате ядерных реакций.

Такая особенность распределения энергии имеет важное значение для понимания радиационных эффектов в различных материалах.

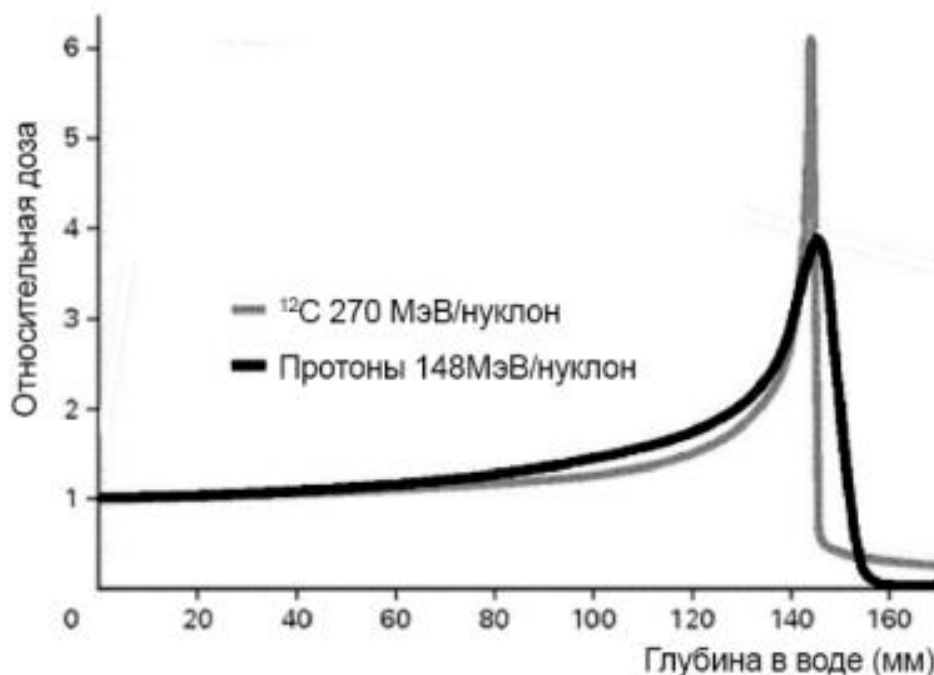


Рисунок 2 – Зависимость дозы от глубины для пучка протонов и углерода

Из вида этих графиков ясно, что, увеличивая или уменьшая энергию частиц, мы будем увеличивать или уменьшать глубину нахождения пиках[1].

Одиночные сбои

Феномен сбоев в интегральных схемах, вызванных воздействием одиночных частиц, впервые привлек серьезное внимание научного сообщества после публикации 1979 года, в которой анализировались необъяснимые отказы микросхем производства Intel. Исследователи установили, что причиной неисправностей являлись α -частицы, образующиеся при распаде урановых включений в керамическом материале корпусов. Источником загрязнения оказалось сырье, добытое на территории бывших урановых разработок. Впоследствии аналогичные проблемы были зафиксированы в продукции IBM, где источником радиации оказались примеси в технологических жидкостях, используемых при производстве.

Параллельно с изучением этих случаев, в том же 1979 году Зиглер и Ленфорд выдвинули гипотезу о возможном влиянии вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии космического излучения с атомами

атмосферы. Однако эта теория получила официальное признание лишь в 1996 году после специальной публикации в IBM Journal of Research and Development.

До конца XX века проблема обсуждалась преимущественно в узкопрофессиональных кругах. Ситуация изменилась после появления материалов в Forbes (2000) и EE Times (2002), особенно после публикации под провокационным заголовком о небезопасности коммерческих компонентов для авиационной техники, что привлекло внимание широкой общественности.

Физика возникновения сбоев.

Принципиальный механизм нарушения работы микросхем заключается в следующем:

- 1) Проникающая частица вызывает ионизацию атомов кремния.
- 2) Образующиеся электронно-дырочные пары разделяются электрическим полем p-n перехода.

- 3) Возникающий импульс тока может изменить состояние ячейки памяти.

В случае нейтронного воздействия ионизация происходит опосредованно - через ядерные реакции с атомами кристаллической решетки.

Современные тенденции и методы защиты.

В профессиональной среде продолжают дискуссии о влиянии миниатюризации элементов на устойчивость к сбоям. Несмотря на разногласия относительно вероятности сбоев в отдельных элементах, общее количество отказов на кристалл продолжает расти пропорционально увеличению степени интеграции.

Современные подходы к решению проблемы можно классифицировать на:

- 1) Профилактические меры:
 - a) Применение КНИ-технологий (снижение чувствительности в 5-10 раз)
 - b) Разработка специализированных ячеек памяти (например, DICE-архитектура)
- 2) Системные методы:
 - a) Алгоритмы коррекции ошибок
 - b) Схемы резервирования и восстановления

Крупнейшие производители полупроводниковых компонентов продолжают интенсивные исследования в этом направлении, учитывая возрастающую важность проблемы для критически важных применений.

Если сбой всё же произошёл, применяются методы обнаружения и исправления ошибок. Для регулярных структур (память, регистры) используют дополнительные контрольные разряды, например, коды Хемминга (ЕСС), позволяющие находить и исправлять ошибки. Для нерегулярных структур (арифметические устройства, конечные автоматы) традиционно применяют резервирование (DMR, TMR), но из-за высокой стоимости разрабатываются более эффективные методы, требующие глубокого понимания работы защищаемого блока.

Лидером в разработке сбоеустойчивых систем является IBM, создающая их с 1960-х годов. Её последние процессоры – Power6 (2007) и Z10 (2008) – выполнены по 65-нм технологии КНИ и обладают высокой устойчивостью к сбоям. Оба используют ЕСС для защиты памяти и данных, логические контроллеры для проверки состояний и методы контроля остатка для арифметических операций.

Особенностью этих процессоров является блок R-unit, сохраняющий архитектурное состояние после выполнения команд. При обнаружении ошибки система восстанавливает последнее корректное состояние или переключается на резервное ядро. Также применяется скрабирование памяти – периодическая проверка и коррекция данных для предотвращения накопления ошибок.

Испытания Power6 под нейтронным облучением показали, что 99,8% сбоев были исправлены без остановки программы, 0,19% потребовали перезапуска, и лишь 0,01% привели к потере данных, что соответствует одному сбою в 1000 лет.

Таким образом, современные методы защиты позволяют значительно снизить влияние одиночных сбоев, обеспечивая высокую надежность электронных систем [2].

Повышение стойкости к воздействию ТЗЧ устройств на базе ПЛИС с использованием инструмента Synplify Premier

В настоящее время программируемые логические интегральные схемы.

(ПЛИС) получили широкое распространение в ряде областей, в особенности характеризующихся относительно небольшими объемами партий и высокой специализацией изделий с точки зрения их функциональности. Среди преимуществ ПЛИС для таких применений – возможность разработки специализированных устройств обработки данных и цифрового управления в значительно более короткие сроки и с меньшими затратами, чем в случае

создания заказных ИС. Одной из сфер, в которых активно применяются ПЛИС, является космическая аппаратура – область, предъявляющая особые требования к компонентам, в том числе в отношении радиационной стойкости.

ПЛИС традиционно используются для построения критически важных функциональных узлов, таких как средства контроля и управления бортовыми системами сбора и обработки информации.

Это означает, что к устройствам на основе ПЛИС предъявляются повышенные требования в отношении устойчивости к отказам, вызываемым внешними воздействиями. Одним из основных таких воздействий в приложении к аппаратуре космического применения является влияние на электронную аппаратуру тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), приводящих к случайному возникновению индуцированного заряда в проводниках микроконтроллера и, как следствие, к образованию нежелательных коротких паразитных импульсов (glitch), которые могут быть в дальнейшем интерпретированы системой как полезные сигналы, что, в свою очередь, может вызывать сбои и даже выход системы из строя.

Непрекращающееся уменьшение геометрических размеров транзисторов на современных кристаллах, а также снижение напряжения питания ПЛИС приводят к тому, что влияние ТЗЧ на работоспособность бортовых систем неуклонно растет. Традиционно подобные проблемы решаются инженерами методом резервирования, которое может быть реализовано как в рамках отдельной ПЛИС, так и за счет дублирования 1 Компания Synopsys, старший инженер по применению. целых функциональных блоков в бортовой электронной системе. В первом случае разработчики модифицируют исходный RTL-код вручную, увеличивая количество блоков с одинаковой функцией и добавляя схемы контроля, позволяющие отследить корректность выполнения ими соответствующих операций. Во втором случае резервирование происходит на уровне аппаратуры, с физическим разделением однотипных блоков. Оба подхода имеют существенные недостатки: дополнительные временные затраты на разработку схемы резервирования и увеличение используемой площади ПЛИС в первом случае и существенное удорожание и увеличение массогабаритных параметров разрабатываемой аппаратуры – во втором[3].

Для улучшения характеристик создаваемых изделий и сокращения времени их разработки целесообразно применение специализированных инструментов автоматизации проектирования, учитывающих соответствующие требования к проектам.

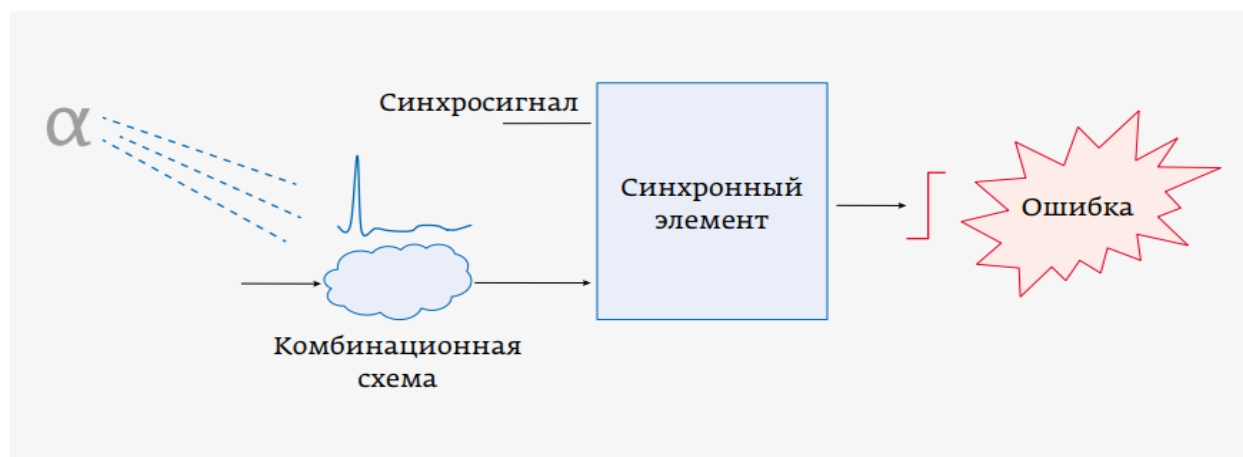


Рисунок 3 – Влияние ТЗЧ на электронное оборудование

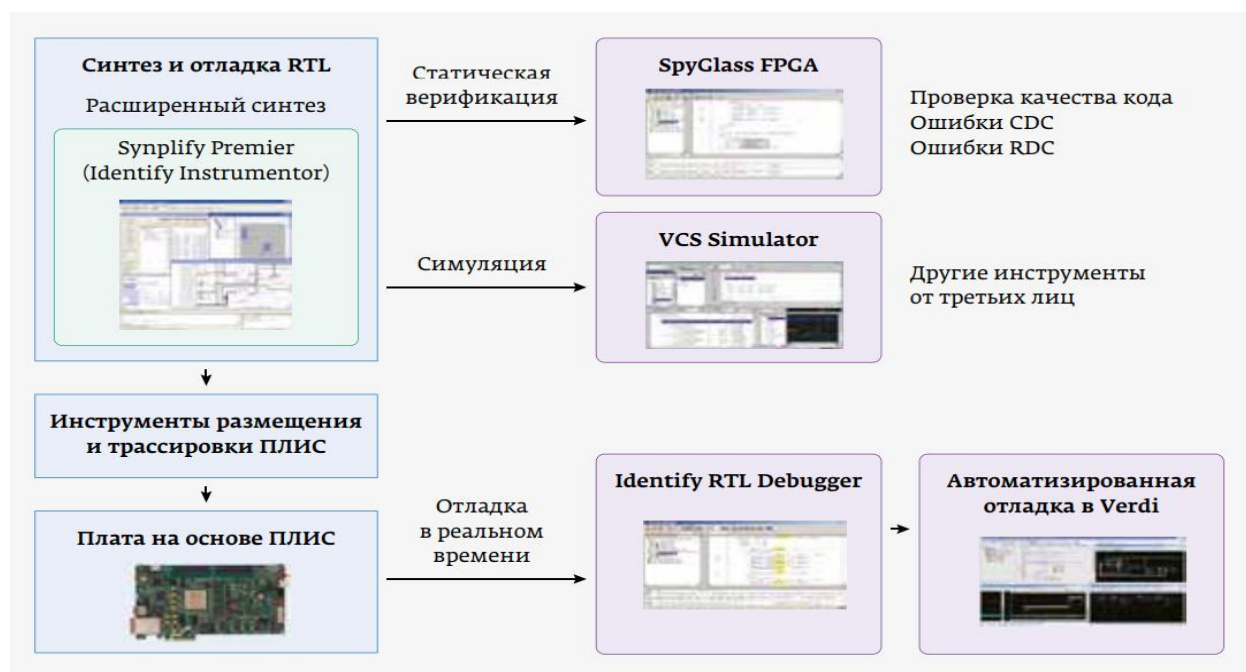


Рисунок 4 – Платформа Synplify Premier и ее интеграция с другими инструментами для разработки проектов ПЛИС

Инструмент Synplify Premier от компании Synopsys широко известен среди инженеров, разрабатывающих проекты под ПЛИС различной архитектуры. Он обладает рядом преимуществ перед стандартными средствами автоматизированного проектирования, предоставляемыми компаниями – производителями ПЛИС. В частности, за счет использования улучшенного алгоритма синтеза (Placement-Aware Logic Synthesis – логический синтез с учетом размещения), доступного в Synplify Premier, можно добиться лучших показателей по занимаемой площади и быстродействию разрабатываемого

устройства. Кроме того, данный инструмент имеет нативную интеграцию с платформой статической верификации SpyGlass, симулятором VCS и графической средой отладки Verdi, что существенно ускоряет процесс разработки, отладки и интеграции устройства, выполненного на базе ПЛИС. В системы, которые предполагается использовать в условиях воздействия ТЗЧ, инструмент Synplify Premier позволяет автоматически внедрять специальные механизмы, повышающие их устойчивость к данному воздействию. Речь идет об алгоритмах троирования, схемах детектирования и исправления единичных сбоев в работе аппаратуры, а также о механизмах защиты конечных автоматов от случайных сбоев. Далее в статье будут рассмотрены все указанные выше способы защиты, и для ПЛИС каждого типа будет выбран наиболее оптимальный вариант защиты проекта от воздействия ТЗЧ. На рынке представлено большое количество ПЛИС различных типов: многократно программируемые ПЛИС на основе SRAM, однократно программируемые ПЛИС (Antifuse), ПЛИС на основе флеш-памяти. Разработчики при построении аппаратуры выбирают тип ПЛИС на основе таких параметров как емкость, скорость, стоимость и встроенные системы защиты от помех. В дальнейшем для каждого типа ПЛИС применяются различные алгоритмы повышения устойчивости к ТЗЧ, связанные с конкретной технологией их реализации. Эти алгоритмы могут оказывать существенное влияние на площадь и временные характеристики устройства. Таким образом, перед разработчиком стоит задача определить, какой именно алгоритм защиты стоит применить к проекту на ПЛИС определенного типа для достижения оптимального быстродействия и устойчивости к помехам. Существующие технологии повышения устойчивости схем к ТЗЧ можно разделить по видам функциональных блоков, к которым они применимы:

1. Комбинационные схемы и секвенциальная логика.
2. Конечные автоматы.
3. Память RAM.

Ниже рассмотрены основные технологии, доступные в инструменте Synplify Premier для каждого вида функциональных блоков, реализованных в ПЛИС различных типов[4].

Современные микроконтроллеры и БИС с высокой степенью интеграции чрезвычайно чувствительны к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства. Попадание даже одной частицы в чувствительный

объем может вызвать одиночные сбои и критические отказы в работе оборудования.

Таблица 1. Сравнение типов ПЛИС

	ПЛИС на основе SRAM	ПЛИС на основе флеш-памяти	ПЛИС типа Antifuse
Элемент хранения	SRAM-ячейка	Ячейка с плавающим затвором	Металлическое соединение
Реконфигурация	Быстрая, неограниченная, динамическая	Медленная, ограниченная, при выключении	Невозможна
Плотность	Высокая	Средняя	Средняя
Устойчивость к воздействию ТЗЧ	Низкая	Средняя, элемент хранения не подвержен влиянию ТЗЧ	Высокая, элемент хранения не подвержен влиянию ТЗЧ

Рисунок 5 – Сравнение типов ПЛИС

Задача прогнозирования частоты сбоев осложняется широким энергетическим спектром ТЗЧ, изотропным характером их распределения и многообразием механизмов взаимодействия с веществом, включая прямую ионизацию и ядерные реакции.

Основной механизм нарушения работы микросхем связан с генерацией электронно-дырочных пар в чувствительных областях (преимущественно в ОПЗ р-п-переходов), что приводит к появлению паразитных импульсов тока и изменению состояния ячеек памяти.

Современные САПР, такие как Synplify Premier, позволяют автоматизировать процесс внедрения механизмов защиты:

- алгоритмы троирования комбинационных схем;
- защита конечных автоматов от случайных сбоев;
- механизмы обнаружения и исправления ошибок в RAM;

Эффективность современных решений. Передовые разработки (например, процессоры IBM Power6 и Z10) демонстрируют исключительную надежность - 99,8% сбоев исправляются без остановки программы, что соответствует вероятности потери данных менее 0,01% (один сбой в 1000 лет).

Необходимость комплексного подхода. Обеспечение радиационной стойкости требует сочетания технологических, схемотехнических и архитектурных решений, адаптированных к конкретному типу ПЛИС и условиям эксплуатации.

Таким образом, несмотря на возрастающие challenges, связанные с миниатюризацией элементов, современные методы защиты позволяют

создавать микроконтроллеры и ПЛИС с достаточным уровнем надежности для применения в космической технике и других критически важных системах [5].

Список литературы

1. Зольников, К.В. Моделирование воздействия ТЗЧ в активных областях элементов микросхем при проектировании / К.В.Зольников.
2. Зольников К.В. Моделирование радиационных эффектов на физико-технологическом уровне в САПР ИЭТ / К.В.Зольников, В.А.Скляр, А.А.Стойанов, К.И.Таперо, А.И.Озеров // Моделирование систем и процессов. - 2012. - № 4. - С. 92-97.
3. Зольников, К.В. Модель радиационных эффектов воздействия тяжелых заряженных частиц в КМОП-элементах микросхем .
4. Зольников, К.В. Проблемы моделирования воздействия космического излучения на элементную базу / К.В.Зольников, В.А.Скляр,
5. Зольников, К.В. Проектирование радиационно-стойких микросхем / К.В.Зольников // Материалы международной конференции «Системные проблемы надежности, качества, компьютерного моделирования, кибернетических, информационных и телекоммуникационных технологий в инновационных проектах». - 2013. -Часть 1. - С.51 - 52.

References

1. Zolnikov, K.V. Modeling the effects of PMT in the active regions of microcircuit elements during design / K.V.Zolnikov.
2. Zolnikov K.V., Sklyar V.A., Stoyanov A.A., Tapero K.I., Ozerov A.I. Modeling of radiation effects at the physico-technological level in CAD and IT / K.V.Zolnikov, Sklyar V.A., Stoyanov A.A., Tapero K.I., Ozerov A.I. // Modeling of systems and processes. - 2012. - No. 4. - pp. 92-97.
3. Zolnikov, K.V. Model of radiation effects of exposure to heavy charged particles in CMOS elements of microcircuits .
4. Zolnikov, K.V. Problems of modeling the effects of cosmic radiation on the element base / K.V.Zolnikov, V.A.Sklyar,
5. Zolnikov, K.V. Design of radiation-resistant microcircuits / K.V.Zolnikov // Proceedings of the international conference "Systemic problems of reliability, quality, computer modeling, cybernetic, information and telecommunication technologies in innovative projects". - 2013. - Part 1. - pp.51-52.