

## **Воздействие космической радиации на цифровые устройства на базе ПЛИС и методы повышения радиационной стойкости данных систем**

**Муллов К.Д.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*  
*e-mail: [Kmullov@gmail.com](mailto:Kmullov@gmail.com)*

### **Аннотация**

Основным предметом исследования в данной статье являются эффекты, возникающие в результате воздействия космического ионизирующего излучения на программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), а также методы борьбы с ними. В работе дается как классификация радиационных эффектов, так и классификация различных методов повышения радиационной стойкости цифровой аппаратуры. Также в данной работе рассматриваются принципы работы некоторых из представленных методов. Основным результатом работы является анализ преимуществ и недостатков методов повышения радиационной стойкости цифровой аппаратуры на базе ПЛИС и рекомендации к разработчикам аппаратуры по применению данных методов.

**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, программируемая логическая интегральная схема, цифровая обработка сигналов, радиационная стойкость

## **Введение**

Радиолокационный мониторинг является одним из наиболее эффективных и перспективных видов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В настоящее время широкое применение в мировой практике нашли радиолокационные средства ДЗЗ, использующие радиолокаторы с синтезированной апертурой самолетного и космического базирования. Развитие микроэлектроники и в частности использование программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), высокоскоростных цифро-аналоговых (ЦАП) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) позволяет все шире применять цифровую обработку сигналов (ЦОС) непосредственно в локаторе, а так же реализовать цифровое формирование луча.

Существенное уменьшение объемов выпуска радиационно-стойкой компонентной базы и сокращение на рынке числа фирм-производителей таковой продукции привело к применению в космических аппаратах ПЛИС уровня качества Industrial. Основная причина заключается в том, что цена данной продукции на 1–2 порядка ниже, чем радиационно-стойкой. Также, из-за несовершенства отечественной элементной базы российские разработчики вынуждены применять ПЛИС иностранного производства [1].

Таким образом, повышение радиационной стойкости цифровой аппаратуры – одна из основных задач, стоящих перед космической промышленностью.

Целью данной работы является анализ воздействия космической радиации на цифровые устройства, а также анализ существующих базовых методов повышения

надежности и работоспособности цифровых систем на базе ПЛИС для космической аппаратуры.

## **1. Воздействие радиации на микросхемы ПЛИС**

Микросхемы ПЛИС чувствительны к воздействию ионизирующей радиации [2]. Радиационные эффекты в ПЛИС, как и в других классах ИС, проявляются как сбои и отказы, которые следует разделять на два вида: параметрические и функциональные.

К параметрическим относятся отказы, связанные с изменением характеристик транзисторов в составе ИС. Параметрические отказы имеют разрушительный характер и приводят к необратимым эффектам в структуре микросхем. При применении цифровых устройств в условиях тяжелой радиационной обстановки используют специальные семейства ПЛИС, имеющие повышенные характеристики защиты от радиации, а также различные конструктивно-технологические методы, например экранирование.

К функциональным сбоям и отказам относят такие события, которые влияют или потенциально могут повлиять на работу отдельного функционального блока или устройства в целом. Во многих случаях именно функциональные отказы определяют уровень радиационной стойкости коммерческих ПЛИС. Это связано с функциональной сложностью микросхем и разнообразием блоков, входящих в ее состав. Эти сбои имеют обратимый характер, т.е. имеется возможность исправления этой ошибки аппаратно-программными методами без отключения питания микросхемы.

Считается, что основная радиационная угроза современным электронным приборам – это единичные события (Single Event Effects, SEE), вызванные воздействием высокоэнергетических частиц [3]. Вносимые в результате единичного события неисправности делятся на устойчивые (hard error) и исправимые (soft error) отказы (рисунок 1).

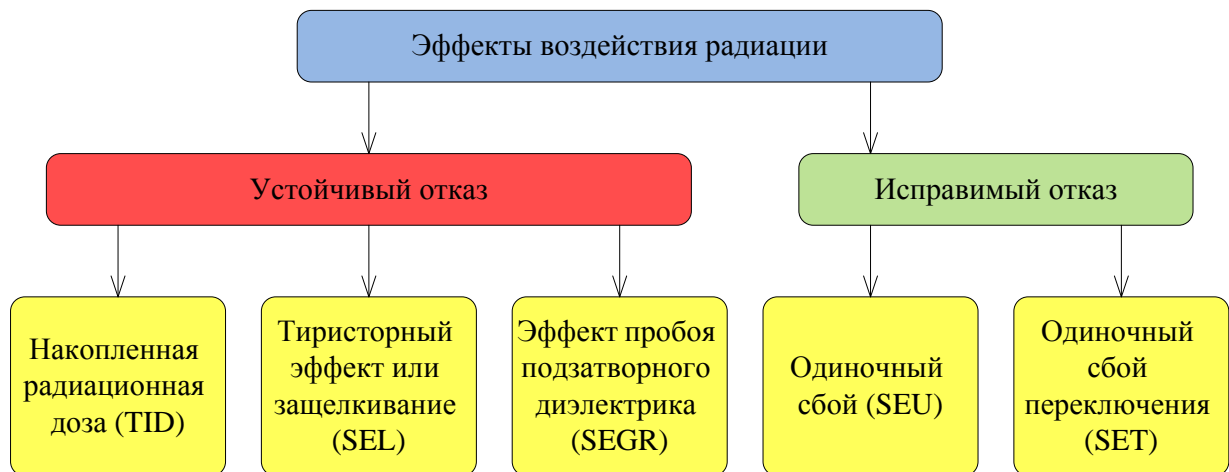


Рисунок 1 – Виды радиационных воздействий, приводящих к отказам

Существует множество различных методов борьбы с единичными событиями, возникающими в результате воздействия ионизирующего излучения. Классификация этих методов и базовые принципы работы некоторых из них будут рассмотрены далее.

## 2. Классификация методов повышения радиационной стойкости микросхем ПЛИС

Различные радиационные тесты доказали необходимость применения методов повышения работоспособности микросхем в условиях воздействия ионизирующего излучения. Все эти методы можно условно классифицировать по принципу их работы, как это показано на рисунке 2:

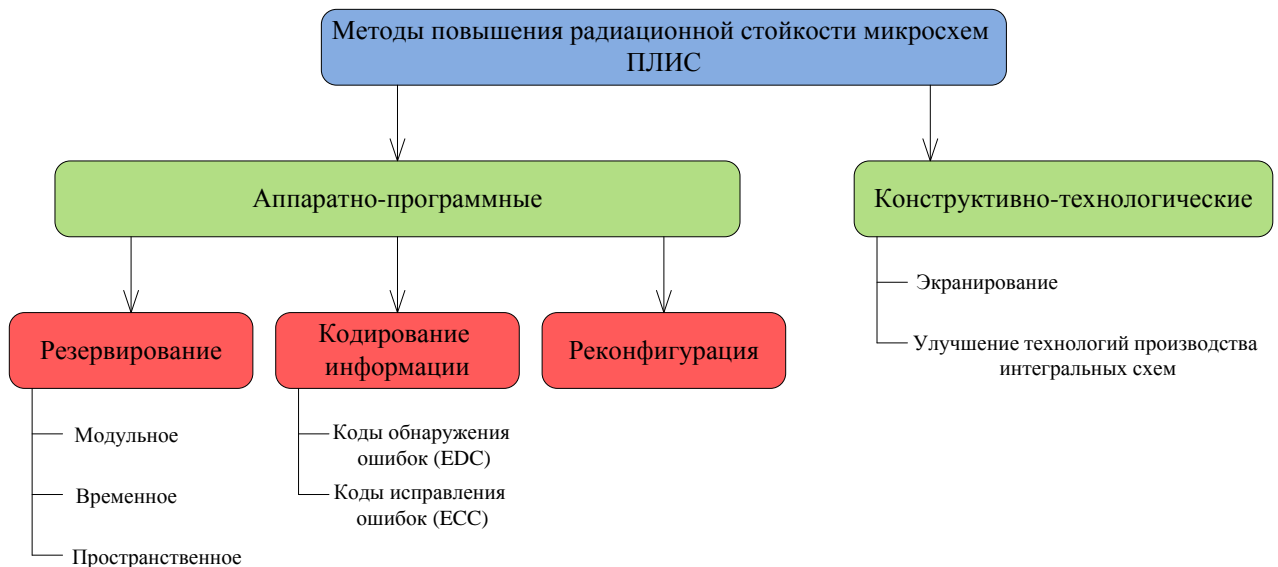


Рисунок 2 – Классификация методов повышения радиационной стойкости

Основным принципом работы конструктивно-технологических методов является ослабление непосредственного влияния ионизирующего излучения на микросхемы. Этот эффект достигается либо с помощью конструирования различного рода защитных экранов, либо изменением параметров транзисторов, исходя из анализа механизмов воздействия радиации на них [3].

Однако введение различного рода избыточностей в аппаратно-программную часть является более эффективным, нежели разработка и применение специальных

радиационно-стойких микросхем. Поэтому для разработчика цифровых устройств на базе ПЛИС наибольший интерес представляют аппаратно-программные методы повышения работоспособности данных систем в условиях воздействия ионизирующего излучения.

Процесс реконфигурации представляет собой периодическое полное обновление конфигурационной памяти ПЛИС с помощью загрузки эталонной конфигурации из энергонезависимой, надежной, радиационно-стойкой памяти.

Также широко применяются различные способы помехоустойчивого кодирования. Более подробно о них можно узнать в [4].

Резервирование – метод повышения надежности технических устройств или поддержания их на требуемом уровне посредством введения аппаратной избыточности за счет включения запасных (резервных) элементов и связей, дополнительных по сравнению с минимально необходимым для выполнения заданных функций в данных условиях работы. Резервирование позволяет копировать информацию с целью ее сохранения после облучения микросхемы.

Ниже будут рассмотрены принципы работы базовых методов резервирования, их преимущества и недостатки, при этом не стоит забывать, что все эти методы могут быть модифицированы и улучшены различными способами.

### **3. Базовые аппаратно-программные методы повышения радиационной стойкости цифровых устройств на базе ПЛИС**

Повышение стойкости ПЛИС к одиночным сбоям с помощью методов резервирования основано на трех принципах:

- резервное хранение информации за счет наличия ячейки хранения неискаженных после единичного события данных;
- обратная связь ячейки хранения исправных данных может способствовать восстановлению поврежденных данных после удара частицы;
- резервирование производится за счет аппаратных средств самой микросхемы ПЛИС, а не за счет увеличения числа микросхем.

### 3.1 Модульное резервирование

В данном методе все элементы цифровой вычислительной схемы троируются, а верное значение на выходе определяется по мажоритарной схеме [5]. Базовая идея данного метода и схема мажоритарного элемента изображены на рисунках 3 и 4, соответственно.

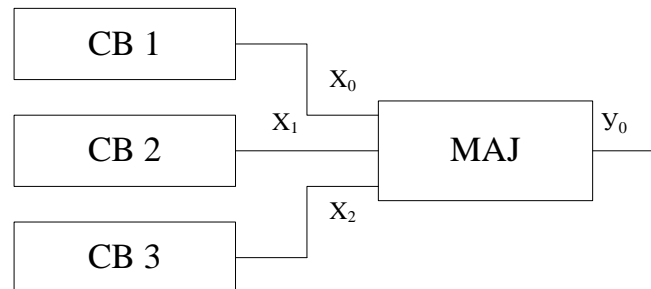


Рисунок 3 – Модульное резервирование

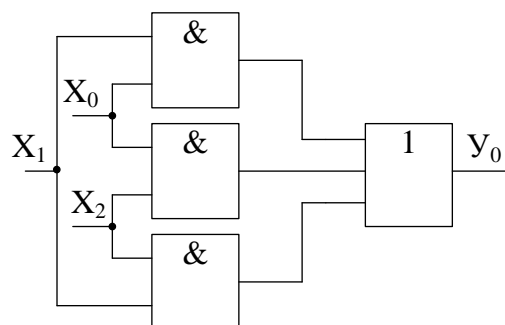


Рисунок 4 – Схема мажоритарного элемента для трех входов

Данный метод имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего, он не гарантирует исправление всех ошибок, в случае если они возникнут одновременно в двух комбинационных блоках. Также данный метод неэффективен против накапливаемых ошибок. Поэтому чаще всего разработчики вместе с данным методом применяют скраббирование, т.е. периодическую реконфигурацию микросхемы для избавления от накопления ошибок. Скраббирование позволяет системе исправлять одиночные сбои без прерывания вычислительных операций.

Также данная техника приводит к увеличению ресурсов, используемых программой (логических ячеек, модулей памяти, цифровых сигнальных процессоров и т.д.), более чем в 3 раза и к увеличению энергии, потребляемой микросхемой.

### 3.2 Временное резервирование (*Duplication with Comparison, DWC*)

В этом методе одновременно используется аппаратная и временная избыточность, как представлено на рисунке 5 [6].

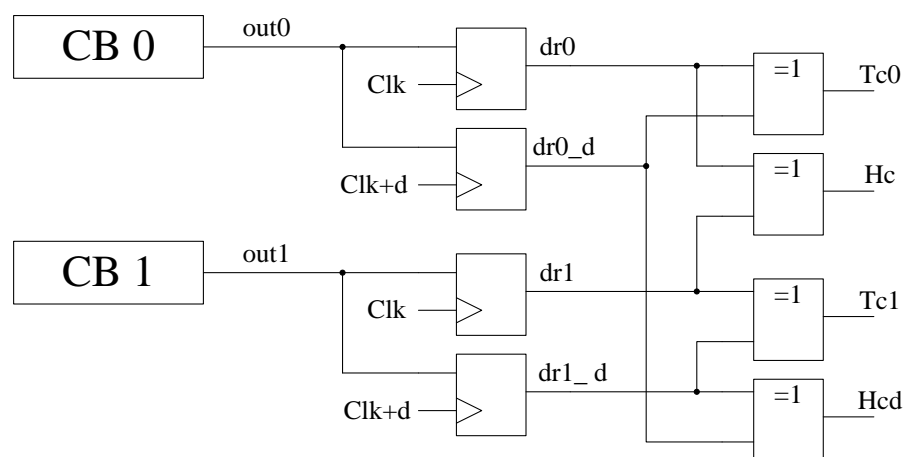


Рисунок 5 – Схема временного резервирования

Два резервных комбинационных блока обозначены СВ0 и СВ1 соответственно. Если сбой происходит в СВ0, то Tc0 и Hcd будут иметь значение '1',



а  $T_{c1}$  и  $H_c$  — '0'. Точно так же, сбой в СВ1 может быть обнаружен, когда  $T_{c1}$  и  $H_{cd}$  принимают значение '1', а  $T_{c0}$  и  $H_c$  — '0'. На основе этих данных конечный автомат выбирает исправный блок. Но в случае, если  $T_{c0}$  и  $H_c$  равны '0', а  $T_{c1}$  и  $H_{cd}$  '1', нет возможности предсказать какой из блоков является неисправным. По этой причине данный метод не может исправить ошибки «защелкивания» нуля или единицы. Это привело к появлению метода дублирования с параллельным обнаружением ошибок, который модифицирует данную технику и позволяет обнаружить постоянный эффект единичного сбоя.

### *3.3 Дублирование со сравнением с параллельным обнаружением ошибок*

*(Concurrent Error Detection, CED)*

Этот метод использует дублирование вместе с параллельным обнаружением ошибок (CED), чтобы определить местоположение ошибки. Этот метод использует функции кодирования и декодирования (рисунок б), чтобы повторно вычислить входные операнды. Эти функции выбираются таким образом, что бы на выходе повторно вычисленные операнды, отличались от структуры исходных операндов в случае возникновения ошибки.

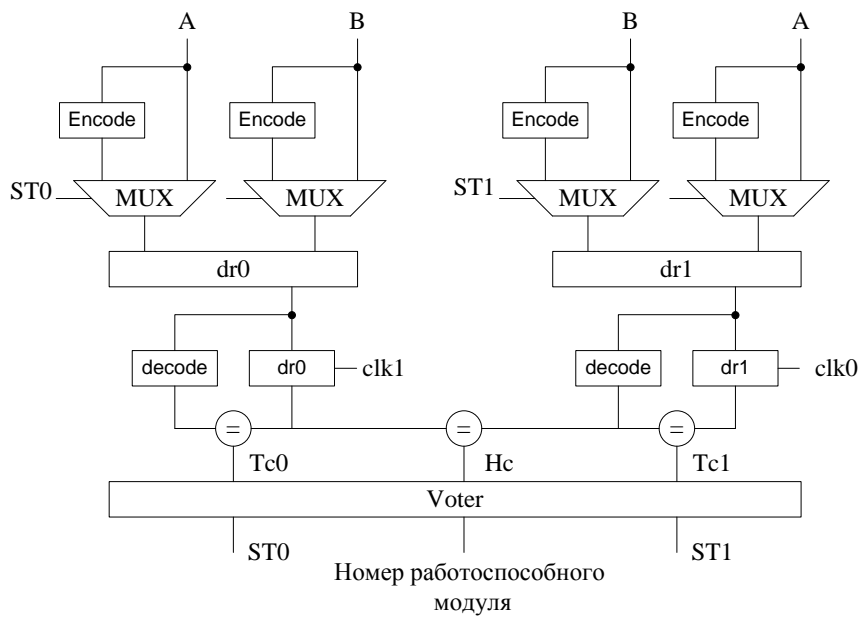


Рисунок 6 – Метод дублирования с параллельным обнаружением ошибок

Схема выбора представлена на рисунке 7. Предположим, ошибка возникает в блоке 0. Тогда,  $Tc0$  и  $Hc$  будут иметь значение '1'. Из диаграммы состояний схемы избирателей, представленной в [7], можно видеть, что схема впервые входит в состояние обнаружения ошибок, если  $Hc$  принимает значение '1'. Из этого состояния она переходит в безошибочное состояние  $dr1$ , если  $Tc0$  равно '1'. Необходимо отметить, что не должно быть сбоев в более чем одном резервном модуле, в том числе в схемах обнаружения и голосования для верного функционирования.

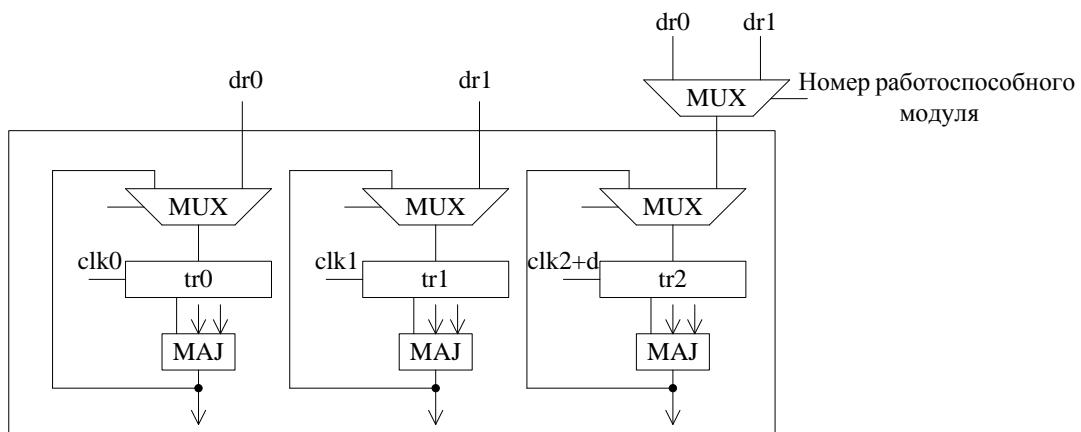


Рисунок 7 – Схема выбора работоспособного блока

В DWC-CED, также как и в методе модульного резервирования, скраббирование исправляет ошибки в пользовательской комбинационной логике, а схема модульного резервирования триггеров конфигурационных логических блоков исправляет сбои в пользовательской логике. Скраббирование должно быть непрерывным, чтобы гарантировать, что произошел только один сбой между двумя периодами реконфигурации. Таким образом, время скраббирования должно быть достаточно коротким, чтобы избежать накопления сбоев в двух различных резервных блоках. Сбои в цепях обнаружения и голосования не мешают непрерывной работе системы, потому что логика дублируется и случаи «залипания» логики устраняются в каждом тактовом цикле.

### **Заключение**

В данной работе рассматривается воздействие космической ионизирующей радиации на ПЛИС. Дана классификация эффектов, возникающих в результате воздействия радиации.

Также в ходе работы были рассмотрены и проанализированы основные принципы работы базовых программных методов повышения радиационной стойкости ПЛИС. Были выявлены основные преимущества и недостатки каждого из методов, и были сформулированы рекомендации к разработчикам устройств цифровой обработки сигналов космического базирования по применению того или иного метода. На основе работы можно сделать вывод о необходимости разработки методов и моделей для проверки работоспособности цифровых схем в условиях воздействия радиации.

## Библиографический список

1. Полесский С.Н., Жаднов В.В., Артюхова М.А., Прохоров В.Ф. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании // Компоненты и технологии. 2010. №9. С. 93-97.
2. M. Ceschia, M. Violante, «Identification and classification of single-event upsets in the configuration memory of SRAM-based FPGAs», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 50, № 6, pp. 2088-2094, Dec. 2003.
3. Мироненко Л., Юдинцев В. Повышение радиационной стойкости интегральных схем. Конструктивные методы на базе промышленной технологии // Электроника. 2012. №8. С. 74-87.
4. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение - М.: Техносфера, 2006. – 320 с.
5. Баранников Л.Н., Ткачев А.Б., Хромцев А.В. Применение циклических кодов и приема со стиранием для цифровых каналов связи // Труды МАИ, 2005, №18: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=34194>
6. Timmaraju A.S., Anand D. A. Input-Output Logic based Fault-Tolerant Design Technique for SRAM-based FPGA's, arXiv:1311.0602v2, 2013.
7. F. Lima, L. Carro, R. Reis, Single Event Upset Mitigation Techniques for SRAM-based FPGAs, Proceedings of the 4th IEEE Latin American Test Workshop, 2003.
8. F.L. Kastensmidt, G. Neuberger, R.F. Hentschke, L. Carro, R. Reis, Designing Fault-Tolerant Techniques for SRAM-Based FPGAs, *IEEE Design & Test of Computers*, vol. 21, № 6, pp. 552–562, 2004.