

На правах рукописи

БОБРОВСКИЙ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СТОЙКОСТИ ПЛИС К ВОЗДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2011 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель Кандидат технических наук, доцент
Калашников Олег Арсеньевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук
Шелепин Николай Алексеевич
Кандидат технических наук
Соболев Сергей Анатольевич

Ведущая организация: ОАО ЦНИИ «Циклон»

Защита состоится _____ 2011 г. в ____ час. ____ мин.

На заседании диссертационного совета Д212.130.02

в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»
по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-76

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Автореферат разослан _____ 2011 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв
в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



П.К. Скоробогатов

Введение. Общая характеристика работы.

Диссертация направлена на решение научно-технической задачи разработки методов и средств прогнозирования стойкости ПЛИС (Программируемая логическая интегральная схема) к воздействию радиационных факторов космического пространства.

Актуальность темы диссертации

Космические аппараты в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различных внешних факторов, в том числе – радиационных. С увеличением срока активного существования космического аппарата на орбите возрастает роль радиационных отказов СБИС, входящих в его состав.

Технические и эксплуатационные характеристики перспективных систем управления и контроля во многом обусловлены техническим уровнем входящих в их состав ПЛИС – электронных узлов, в базе которых реализуется большинство интерфейсных контроллеров, участвующих в передаче и обработке информации на борту космического аппарата между процессорными модулями.

В связи с этим актуальной является задача прогнозирования радиационной стойкости ПЛИС, работающих в условиях внешних радиационных факторов космического пространства.

Во многих случаях функциональные отказы являются доминирующими и определяют уровень радиационной стойкости ПЛИС. Это связано с функциональной сложностью микросхем и разнообразием блоков, входящих в её состав. Поэтому, методики радиационных исследований ПЛИС должны в обязательном порядке включать развернутые процедуры функционального контроля, обладающие высокой диагностической способностью.

Подготовка тестовых векторов, обеспечивающих полный функциональный контроль (ФК), может занимать несколько месяцев, а сам функциональный контроль – минуты. Время облучения должно более чем на порядок превышать время полного цикла тестирования, это определяется, во-первых, 10% погрешностью определения уровня функционального сбоя, во-вторых, отжигом микросхемы во время измерения параметров без воздействия.

Актуальной является задача сокращения, как времени подготовки ФК ПЛИС, так и времени проведения процедуры ФК без потери достоверности обнаружения функциональных отказов. Решение этой задачи основывается на исследовании закономерностей радиационного поведения ПЛИС, анализе архитектурных особенностей ПЛИС, разработке эф-

фективных методов, алгоритмов, методик и аппаратно-программных средств ФК при проведении радиационного эксперимента.

При изучении локальных радиационных эффектов, вызванных воздействием отдельных ядерных частиц, основное внимание уделяется двум: тиристорному эффекту и одиночным эффектам функционального отказа устройства, реализованного в ПЛИС функционирования, связанным с нарушением конфигурации ПЛИС из-за одиночных сбоев в конфигурационной памяти.

Одиночное событие функционального отказа устройства, реализованного в ПЛИС (Single-event Functional Interrupts (SEFI)) – такое нарушение функционирования, для восстановления которого требуется перезагрузка конфигурационной информации.

При разработке устройства возможны многочисленные варианты его реализации, различающиеся количеством функционально чувствительных ячеек конфигурационной памяти. Экспериментально проверять каждую реализацию и выбирать оптимальную не представляется возможным, поэтому, актуальной является задача разработки расчетно-экспериментального метода оценки сечения функционального отказа устройства, реализованного в ПЛИС, основывающегося на одном эксперименте по оценке сечения одиночных сбоев всей конфигурационной памяти и на расчетной оценке сечения функционального отказа конкретной реализации устройства. Решению указанных задач посвящена диссертационная работа.

Состояние исследований по проблеме.

Научно-методическому обеспечению проведения испытаний СБИС на стойкость к воздействию радиационных космических факторов посвящены работы д.т.н. Чумакова А.И., к.т.н. Яненко А.В. (каф. 3 НИЯУ МИФИ). Вопросы разработки, изготовления и развития ПЛИС для космического применения представлены в трудах Быстрицкого А.В., Цыбина С.А. (Конструкторско-технологический центр «Электроника», г. Воронеж). Однако в этих трудах практически не рассматривались методы функционального контроля ПЛИС при проведении радиационных испытаний.

Проектированию систем на кристалле в базисе ПЛИС и способам повышения производительности и снижения энергопотребления посвящены многочисленные работы Шагурина И.И., Шалтырева В.А. (каф. 27 НИЯУ МИФИ).

Вопросам диагностического неразрушающего контроля однократно программируемых ПЛИС ф. Actel, основанного на накоплении статистики результатов измерений тока

потребления по партиям ПЛИС, посвящены работы Краснова М.И. (ОАО “Российские космические системы”).

Функциональному и параметрическому контролю ПЛИС, а также эффектам, возникающим в ПЛИС при воздействии радиационных факторов, посвящены многочисленные работы зарубежных ученых (Buchanan N.J., Gingrich D.M., Green P.W., MacQueen D.M., Fabula J., Wang J.J., Sterpone L, Violante M).

Вопросами ФК функционально-сложных СБИС посвящены многочисленные работы к.т.н. Калашникова О.А., к.т.н. Некрасова П.В., к.т.н. Демидова А.А. (каф. 3 НИЯУ МИФИ). Эти работы посвящены преимущественно микропроцессорным СБИС и не учитывают особенностей ПЛИС.

Имеющиеся на момент начала работы аппаратно-программные средства радиационного эксперимента не обеспечивали возможности полноценного автоматизированного управления, функционального контроля и диагностирования отказов и сбоев ПЛИС в реальном времени непосредственно в процессе облучения.

Таким образом, возникла необходимость структурировать методы функционального контроля ПЛИС, определить оптимальный метод оперативного ФК в процессе испытаний ПЛИС на стойкость к воздействию радиационных факторов космического пространства, разработать методику подготовки и проведения ФК ПЛИС, а также программно-аппаратные средства для контроля современных ПЛИС в условиях воздействия факторов космического пространства.

Цель диссертации: разработка методов и средств прогнозирования стойкости ПЛИС к воздействию радиационных факторов космического пространства.

Основными задачами диссертации являются:

- теоретический анализ и экспериментальные исследования основных закономерностей и доминирующих радиационных эффектов в ПЛИС при воздействии радиационных факторов космического пространства;
- анализ и развитие существующих методов функционального контроля ПЛИС и оценка их эффективности;
- разработка новых и совершенствование существующих методических и технических средств испытаний ПЛИС на стойкость к воздействию радиационных факторов космического пространства, позволяющих обеспечить достоверность определения работоспособности ПЛИС в условиях радиационного воздействия и выявить отказавший функциональный блок;

- получение и систематизация экспериментальных данных, устанавливающих общность радиационного поведения ПЛИС.

- разработка расчетно-экспериментального метода оценки сечения функционального сбоя устройств, реализованных в ПЛИС.

Научная новизна работы:

1. Выявлены, описаны и систематизированы преобладающие типы функциональных отказов ПЛИС при воздействии радиационных факторов космического пространства.

2. Предложен метод независимого функционального контроля базовых блоков ПЛИС, позволяющий определить момент функционального отказа ПЛИС и отказавший блок, а также минимизировать временные и трудовые затраты при подготовке и проведении радиационных испытаний за счет создания универсальной библиотеки тестовых прошивок ПЛИС и соответствующих им внешних тестовых блоков.

3. Предложен расчетно-экспериментальный метод оценки сечения функциональных сбоев устройств, реализованных в ПЛИС. Метод позволяет сократить объем экспериментальных исследований при оценке сечения функционального отказа устройства, реализованного в ПЛИС и оптимизировать функциональную реализацию устройства.

Практическая ценность.

1. Разработана библиотека тестовых блоков базовых элементов ПЛИС, применяемая для формирования тестовой прошивки с учетом доступных ресурсов ПЛИС, позволяющая достоверно оценивать уровень радиационной стойкости ПЛИС к эффектам накопленной дозы с указанием базового блока, определяющего уровень функционального отказа.

2. В базисе аппаратуры National Instruments и программного обеспечения LabView разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий, в отличие от имеющихся ранее, выполнять полный функциональный и параметрический контроль базовых блоков современных ПЛИС непосредственно в процессе радиационного эксперимента.

3. С использованием разработанных методик получены результаты экспериментальных исследований стойкости к воздействию радиационных факторов космического пространства широкой номенклатуры ПЛИС отечественного и иностранного производства (Xilinx, Altera, Actel, Lattice Semiconductor, ОАО “Конструкторско-технологический центр Электроника”).

4. Результаты диссертации внедрены в ОАО “Конструкторско-технологический центр Электроника” при выполнении ОКР “Вельс” и “Геотермист” по созданию двух первых отечественных программируемых логических интегральных схем.

5. Результаты диссертации внедрены в ОАО “ЭНПО СПЭЛС” в качестве стандартной процедуры проведения радиационных испытаний ПЛИС, подтверждающейся утвержденной методикой проведения радиационных испытаний ПЛИС.

6. Результаты исследований вошли в отчетные материалы работ по проектированию космической аппаратуры систем МКС, “Глонасс”, “Ресурс-П”, “Лиана”, “Персона”, “БелКА”, “KazSat-2”, “Луч-5Б”.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Метод независимого функционального контроля базовых блоков ПЛИС, позволяющий определить момент функционального отказа ПЛИС и отказавший блок, а также оптимизировать временные и трудовые затраты при подготовке и проведении радиационных испытаний за счет создания универсальной библиотеки тестовых прошивок в ПЛИС и соответствующих им внешних тестовых блоков.

2. Метод расчетно-экспериментальной оценки сечения одиночных функциональных сбоев ПЛИС, позволяющий оценивать сечение без необходимости проведения экспериментальных исследований для каждой реализации устройства.

3. Аппаратно-программный комплекс, отличающийся от ранее имеющихся тем, что обеспечивает полноценный функциональный и параметрический контроль ПЛИС в реальном времени в активных динамических режимах работы непосредственно в процессе радиационного воздействия, а также позволяет управлять различными моделирующими установками и имитаторами.

4. Результаты экспериментальных исследований радиационного поведения ПЛИС, подтверждающие обоснованность предложенных методических и технических средств прогнозирования функциональных отказов, а именно, метода независимого функционального контроля базовых блоков ПЛИС.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на “Научных сессиях НИЯУ МИФИ” (Москва, 2007-2010 гг.); на Российских научно-технических конференциях “Электроника, микро– и нанoeлектроника” (г. Пушкинские Горы 2007 г., г. Петрозаводск 2008 г., г.Н.Новгород 2009 г.), Российской научной конференции “Радиационная стойкость электронных систем – Стойкосмть-2010” г. Лыткарино. Основные результаты диссертации опубликованы в 14 работах (в период с 2007 по 2011 гг.), в том числе 7 без соавторов, 2 из списка ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 118 страниц, в том числе 59 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 92 наименований и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Содержание диссертации

Введение обосновывает актуальность работы, обобщает краткие результаты анализа ранее выполненных научных работ по тематике.

Спецификой современных ПЛИС является их функциональная сложность и высокая степень интеграции, вследствие чего причины радиационных отказов современных ПЛИС могут быть различными. ФК при радиационных испытаниях функционально сложных схем имеет ряд существенных особенностей.

Процедура функционального контроля большинства микросхем, таких как логика, память и др. реализована как последовательность тестовых векторов. ФК ПЛИС предполагает кроме последовательности тестовых векторов создание внутренней прошивки, определяющей функции, которые будет выполнять ПЛИС. Процедуры ФК специфичны для различных классов ПЛИС и зависят от доступных у конкретного семейства функциональных ресурсов.

Условия радиационных испытаний накладывают ряд ограничений как на сами методы ФК (по времени выполнения тестовой программы и по учету возможного проявления радиационных эффектов), так и на используемую аппаратуру. Конструктивные особенности источников ионизирующего излучения, наличие полей ионизационного излучения и ограниченность времени проведения функционального контроля определяют специфику радиационных испытаний, связанных с методами и техническими средствами проведения ФК.

Таким образом, актуальной является задача разработки методических и технических средств ФК ПЛИС в ходе радиационных испытаний на стойкость к факторам космического пространства. Анализ этой задачи начнем с рассмотрения существующих методов ФК ПЛИС, используемых при радиационных испытаниях. Определим границы применимости каждого метода их основные достоинства и недостатки.

Первая глава посвящена анализу проблемной ситуации в области; в ней описываются типовая структура и особенности построения современных ПЛИС, приведена классификация ПЛИС; с учетом архитектурных особенностей выделены базовые блоки ПЛИС; рассмотрены радиационные эффекты и, как следствие, функциональные отказы, возникающие в ПЛИС при воздействии факторов космического пространства (дозовые эффекты и эффекты от отдельных ядерных частиц); обоснована постановка задач исследований.

Полный функциональный контроль ПЛИС.

Метод полного ФК реализуется с использованием промышленных аппаратно-программных комплексов (тестеров), к ним можно отнести тестеры фирм Aligent Technologies, Форм. Большие трудозатраты на подготовку функционального контроля ПЛИС, а также продолжительное время его проведения, а также большие габаритные размеры тестера, крайне ограниченная мобильность и высокая стоимость ограничивают применимость такого подхода к функциональному контролю при проведении радиационных испытаний.

Функциональный контроль в составе системы с реальной прошивкой.

При использовании метода функционального контроля ПЛИС в реальном режиме функционирования испытания проводятся в составе устройства (материнской платы) с прошивкой, с которой ПЛИС будет работать на борту космического аппарата. В случае технической возможности применения данной материнской платы во время радиационного эксперимента метод является достаточно оперативным, но, в то же время, мало информативным и практически не позволяет определить причину возникновения отказа.

Применение специализированной тестовой прошивки.

Метод основан на разработке специализированной тестовой прошивки, позволяющей проводить функциональный контроль схемы. Глубина такого ФК, а следовательно и вероятность обнаружения сбоя зависит от её состава.

В литературе встречаются различные варианты реализации такой прошивки. Одни используют прошивки типа многоразрядного счетчика, сдвигового регистра или структуры типа FIFO, заполняющие 100% ресурсов ПЛИС (триггеров). Другие же предпочитают не раскрывать подробности прошивки, говоря лишь, что проводится полное тестирование всех ключевых блоков.

Использование первых двух методов из-за указанных недостатков не позволяет эффективно определять уровень стойкости ПЛИС при проведении радиационных испытаний.

Наиболее подходящим методом функционального контроля является использование специализированной тестовой прошивки.

В качестве базовых блоков ПЛИС типа FPGA можно выделить следующие: запоминающий элемент логической ячейки, мультиплексор логической ячейки, выделенная блочная память, таблица преобразований, PLL, DSP-ядро, Ethernet контроллер и другие периферийные блоки.

Дозовые радиационные эффекты, возникающие в ПЛИС, проявляются в виде параметрических и функциональных отказов. Функциональные отказы проявляются в виде:

1) отказов конфигурационной памяти, приводя к полной потере работоспособности ПЛИС

2) отказов в блоках пользовательской памяти (ОЗУ, Flash), запоминающих элементах логических ячеек, комбинационных схемах, периферийных функциональных блоках, таких как PLL, DSP, Ethernet-контроллер

Одиночные радиационные эффекты, возникающие в ПЛИС при воздействии ОЯЧ:

1) Одиночные сбои в запоминающих элементах конфигурационной и пользовательской памяти.

2) одиночные эффекты в комбинационных схемах за счет возникновения импульсных помех при протекании ионизационных токов.

3) Защелкивание четырехслойных паразитных структур (тиристорный эффект).

Вторая глава содержит описание предложенного метода независимого функционального контроля базовых блоков ПЛИС, позволяющего протестировать каждый тип примитивов ПЛИС и получить более точный и подробный (с выявлением отказавшего блока) результат по сравнению с методом, использующим универсальные тестовые прошивки.

Автором предлагается метод **независимого функционального контроля базовых элементов ПЛИС**. Метод основан на выделении в ПЛИС элементарных функциональных блоков (примитивов). Для каждого типа функциональных блоков создается тестовый модуль таким образом, чтобы все базовые блоки ПЛИС контролировались без взаимосвязи друг с другом или, в случае невозможности избежать влияния одного класса блоков на другой, можно однозначно сказать, какой из блоков отказал – тестируемый или влияющий. Кроме того должна быть возможность оценки деградации временных характеристик основных элементов, определяющих скоростные параметры ПЛИС. Методика оценки временных параметров строится на интегральном принципе, а именно – оценке суммарной деградации параметра нескольких однотипных блоков. При использовании такого подхода увеличивается точность оценки, и уменьшаются требования к измерительной аппаратуре.

Метод независимого функционального контроля базовых элементов ПЛИС обладает следующими достоинствами: универсальность, полнота тестирования, скорость проведения теста, учет вида радиационного воздействия и характерных эффектов.

Регулярность структуры ПЛИС, схожая архитектура в рамках одного класса или семейства ПЛИС и большое количество однотипных элементов позволяет создать библиотеку тестовых блоков, сформированных таким образом, что в каждом блоке задействован только один тип базовых элементов.

Создание такой библиотеки на языке VHDL позволяет обеспечить переносимость функциональных блоков как на ПЛИС внутри одного семейства, так и на ПЛИС других семейств и даже производителей. Раздельное тестирование обеспечивает достоверное определение отказавшего блока, а также гибкость при формировании состава и объема функционального контроля в зависимости от доступных ресурсов ПЛИС.

В третьей главе содержатся результаты экспериментальной апробации методики, основанной на методе независимого функционального контроля базовых блоков ПЛИС. Приведено сравнение предложенной методики с другими, применяемыми зарубежными и отечественными исследователями. Показана эффективность методики для достоверного определения уровня функционального отказа. Приведены закономерности отказов ПЛИС различных классов и производителей.

Для оценки эффективности методов функционального контроля были проведены сравнительные испытания ПЛИС с двумя типами прошивок. В качестве тестовых объектов выступали три ПЛИС: EPF10K50 относится к классу FPGA и AX250 – к классу Antifuse, АЗРЕ600L – к классу CPLD.

В качестве универсальной тестовой прошивки использовалась схема многоразрядного счетчика/делителя частоты, обладающая следующими достоинствами: простота реализации, возможность задействовать до 100% логических ячеек, минимум требований к аппаратуре функционального контроля (фактически необходим только осциллограф и генератор опорной частоты). В то же время, такая прошивка имеет существенные недостатки: невозможность выявления оказавшего блока, низкое покрытие по типам тестируемых блоков, что может привести к неверному определению момента функционального отказа.

В таблице 1 приведено сравнение уровней стойкости выделенных базовых блоков для трех исследуемых ПЛИС. У всех трех объектов был зафиксирован функциональный отказ. Рассмотрим подробнее структуру функционального отказа. У ПЛИС EPF10K50 наименее стойким блоком оказалась блочная память, в которой произошел функциональный сбой, характеризуемый "залипанием" всех ячеек памяти (рисунок 1). Далее наблюдался отказ запоминающих элементов логической ячейки, связанный с деградацией динамических параметров триггера и проявившийся в увеличении более чем на 10% времени его переключе-

ния (рисунок 2). Все остальные функциональные тесты не показали отказов, в том числе функциональный контроль по упрощенной методике.

При тестировании ПЛИС AX250 в течение всего времени облучения все параметры, включая ток потребления схемы, находились в пределах установленных норм, что говорит о еще большей важности функционального контроля. Из всего набора функциональных тестов только ФК PLL обнаружил отказ, при этом упрощенная прошивка не позволила бы его выявить.

Таблица 1 Результаты сравнения уровней стойкости контролируемых блоков трех исследуемых ПЛИС: EPF10K50, AX250 и A3PE600L на стойкость к эффектам накопленной дозы

EPF10K50						AX250					A3PE600L						
Доза, 10^3 ед.	Счетчик(упрощенный ФК)	Сдвиговый регистр	Триггер	Мультиплексор	Блочная память	Доза, 10^3 ед.	Счетчик(упрощенный ФК)	Блочная память	PLL	Триггер	Доза, 10^3 ед.	Счетчик(упрощенный ФК)	Блочная память	Flash ROM	Триггер	PLL	Умножитель
24	+	+	+	+	+	200	+	+	+	+	48	+	+	+	+	+	+
28	+	+	+	+	—	220	+	+	—	+	50	+	+	—	+	+	+
32	+	+	+	+	—	240	+	+	—	+	54	+	—	—	+	+	+
36	+	+	—	+	—	260	+	+	—	+	56	+	—	—	+	+	+
40	+	+	—	+	—	300	+	+	—	+	60	—	—	—	—	+	—
44	+	+	—	+	—	340	+	+	—	+	85	—	—	—	—	—	—

У ПЛИС A3PE600L функциональный отказ определялся отказом пользовательской flash памяти, затем отказала блочная память ОЗУ, многоразрядный счетчик и умножитель. Блок PLL отказал значительно позже.

Таким образом, на этих примерах показана эффективность метода независимого функционального контроля по сравнению с упрощенным ФК и недопустимость использования упрощенной прошивки при проведении функционального контроля ПЛИС в процессе испытаний на стойкость к дозовому воздействию факторов космического пространства.

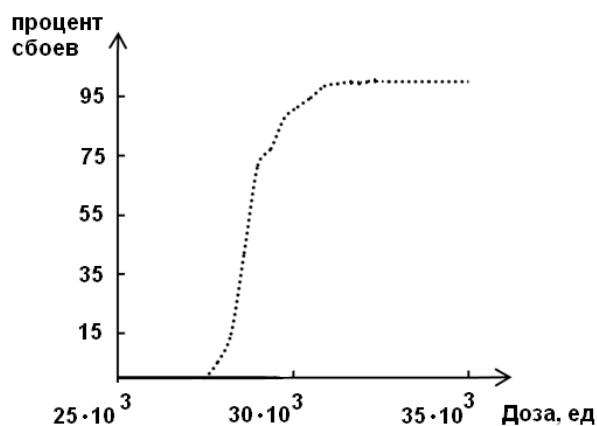


Рисунок 1 График зависимости доли отказавших ячеек блочной памяти ПЛИС EPF10K50 от накопленной дозы

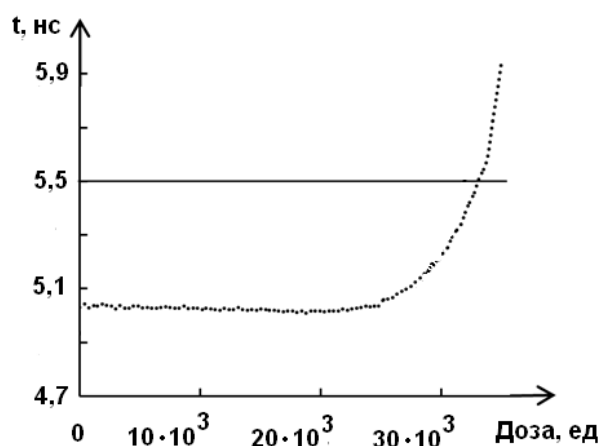


Рисунок 2 График зависимости времени переключения триггера ПЛИС EPF10K50 от накопленной дозы

Четвертая глава посвящена расчетно-экспериментальному методу оценки сечения одиночных событий функционального сбоя устройства, реализованного в ПЛИС. Представлена методика экспериментальной оценки сечения одиночных сбоев ПЛИС. На основании файлов прошивки ПЛИС и данных по структуре ПЛИС рассчитывается количество ячеек конфигурационной памяти, сбои в которых приводят к функциональным сбоям реализованного в ПЛИС устройства.

Одиночные сбои в ПЛИС имеют свою специфику. Кроме сбоев в пользовательских областях памяти, большое значение имеют сбои в конфигурационной памяти, которые могут привести к полному нарушению функционирования устройства. При построении устройства, как правило, доступно несколько вариантов реализации функций, в том числе и с применением схем резервирования, кодирования и других способов защиты от сбоев. Использование таких методов позволит снизить количество ячеек конфигурационной памяти, сбои в которых приведут к нарушению функционирования всего устройства. Таким образом, можно оптимизировать схему по параметру сечение одиночного эффекта функционального отказа устройства, реализованного в ПЛИС(SEFI). Все не критичные сбои в ячейках конфигурационной памяти исправляются стандартными средствами с использованием методики частичного реконфигурирования без прерывания работы схемы.

Проведение испытаний каждой реализации устройства на реальных установках невозможно по причине высокой стоимости самих испытаний и больших временных затрат на подготовку и проведение испытаний. Для уменьшения затрат на оценку параметра се-

чения одиночного эффекта функционального отказа устройства, реализованного в ПЛИС предлагается **расчетно-экспериментальный метод**, основанный на экспериментальной оценке сечения одиночных сбоев ячейки конфигурационной памяти и расчетной оценке количества ячеек конфигурационной памяти, сбои в которых приведут к нарушению функционирования устройства.

Экспериментальная оценка сечения одиночных сбоев конфигурационной памяти производится по стандартной методике: облучение ПЛИС пучком ОЯЧ на моделирующей установке, считывание прошивки ПЛИС через JTAG порт или другими средствами, подсчет количества сбившихся ячеек и расчет сечения одиночных сбоев в ячейке конфигурационной памяти. Этот параметр оценивается один раз и не зависит от функции, которая реализована в устройстве.

Расчетная часть основана на использовании специализированного программного обеспечения (ПО). Входными данными для ПО являются файл размещения проекта на кристалле (bit-файл, xdl-файл или аналогичные, получаемые в результате работы САПР производителя), модель конфигурационного логического блока, включающая базу данных по количеству ячеек конфигурационной памяти, связанных с конкретным ресурсом, и базу данных взаимовлияющих межсоединений. На основе этих данных производится оценка количества ячеек конфигурационной памяти, сбои в которых приведут к нарушению функционирования устройства. Зная количество критичных ячеек и сечение одиночных сбоев ячейки конфигурационной памяти, рассчитывается сечение одиночного эффекта функционального отказа устройства, реализованного в ПЛИС(SEFI).

В случае отсутствия информации о внутреннем строении ПЛИС применяется вторая методика, заключающаяся в последовательном внесении "сбоя" в каждую ячейку конфигурационной памяти и контроле последствий, вызванных таким "сбоем". В качестве исходных данных используется файл с конфигурационной информацией, записываемой в ПЛИС в стандартном формате САПР производителя (.bit файл для ПЛИС Xilinx, .sof или .hex для ПЛИС Altera).

Алгоритм последовательном внесении "сбоя" реализуется в виде специализированного программного обеспечения и стандартной схемы загрузки конфигурационной информации в ПЛИС при помощи загрузочного кабеля или в виде аппаратного блока на микроконтроллере, производящего модификацию конфигурационного потока непосредственно в процессе конфигурирования.

Применение такого метода позволит сократить объем экспериментальных исследований и ускорить процесс разработки сбоеустойчивых устройств.

Пятая глава посвящена разработке аппаратно-программных средств функционального и параметрического контроля ПЛИС при проведении радиационных испытаний. Обоснован выбор аппаратной платформы на базе оборудования National Instruments. Приведен состав системы функционального контроля исходя из сформулированных требований. Описано разработанное в базисе LabView программное обеспечение и набор библиотечных модулей для проведения функционального и параметрического контроля ПЛИС.

Для технического обеспечения проведения испытаний и с учетом сформулированных требований было предложено развитие существующих средств функционального контроля. Аппаратно-программный комплекс функционального контроля ПЛИС строится на базе оборудования фирмы National Instruments (NI) с использованием программного обеспечения LabView. Отличительной особенностью данной системы является ее универсальность, широкая распространенность, возможность интеграции и управления электронной аппаратурой других производителей, удобный интерфейс создания программы управления, широкий спектр аппаратных возможностей.

Программное обеспечение для организации испытаний ПЛИС строится по модульному принципу как со стороны программного обеспечения оператора, так и со стороны тестовой прошивки ПЛИС. Программное обеспечение со стороны оператора должно обеспечивать выполнение функций параметрического и функционального контроля, а также управлять и вести протокол хода эксперимента.

Возможность создания виртуальных приборов позволяет строить универсальные блоки для управления и сбора информации для каждого примитива ПЛИС. Используя универсальность коммутационной платы и возможность назначения входов/выходов ПЛИС на любой вывод микросхемы, строится универсальный блок параметрического контроля.

Для функционального контроля каждого типа примитивов разработан виртуальный подприбор, реализующий соответствующий алгоритм тестирования с учетом типа примитива и радиационного воздействия. После анализа архитектуры исследуемой ПЛИС в соответствии с выделенными базовыми функциональными блоками формируется единый виртуальный подприбор функционального контроля ПЛИС, который интегрируется в универсальную пользовательскую оболочку.

Кроме пользовательского программного обеспечения, для осуществления функционального контроля ПЛИС требуется сформировать соответствующую тестовую прошивку.

Она также строится по блочному принципу путем компиляции прошивки из библиотеки тестовых блоков в соответствии с доступными ресурсами ПЛИС.

Заключение обобщает основные теоретические и практические результаты диссертации.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

Решена поставленная задача разработки методов и средств прогнозирования стойкости ПЛИС к воздействию радиационных факторов космического пространства.

1. Выявлены, описаны и систематизированы преобладающие типы функциональных отказов ПЛИС при воздействии радиационных факторов космического пространства.

2. Предложен метод независимого функционального контроля базовых блоков ПЛИС, позволяющий определить момент функционального отказа ПЛИС и отказавший блок, а также сократить не менее чем в полтора-два раза временные и трудозатраты при подготовке и проведении радиационных испытаний за счет создания универсальной библиотеки тестовых прошивок ПЛИС и соответствующих им внешних тестовых блоков. Временные затраты сводятся к анализу доступных ресурсов ПЛИС и набору соответствующих тестовых блоков.

3. Предложен расчетно-экспериментальный метод оценки сечения функциональных сбоев устройств, реализованных в ПЛИС. Метод позволяет сократить объем экспериментальных исследований при оценке сечения функционального отказа устройства, реализованного в ПЛИС и оптимизировать функциональную реализацию устройства.

Основной практический результат диссертации заключается в разработке методических и технических средств, обеспечивающих ФК ПЛИС при проведении радиационных исследований на моделирующих установках и имитаторах при оценке параметров стойкости к факторам космического пространства (эффекты накопленной дозы и эффекты от воздействия отдельных ядерных частиц).

Частные практические результаты работы и их реализация:

1. Разработана библиотека тестовых блоков базовых элементов ПЛИС, применяемая для формирования тестовой прошивки с учетом доступных ресурсов ПЛИС, позволяющая достоверно оценивать уровень радиационной стойкости ПЛИС к эффектам накопленной дозы с указанием базового блока, определяющего уровень функционального отказа.

2. Предложена и апробирована методика функционального контроля ПЛИС, включающая ФК всех базовых примитивов ПЛИС с измерением основных динамических параметров, таких как время переключения триггера.

3. С использованием разработанных методик проведены экспериментальные исследования стойкости к воздействию радиационных факторов космического пространства ПЛИС отечественного и иностранного производства (Xilinx, Altera, Actel, Lattice Semiconductor, ОАО “Конструкторско-технологический центр Электроника”).

4. Результаты диссертации внедрены в ОАО “Конструкторско-технологический центр Электроника” при выполнении ОКР по созданию первых отечественных ПЛИС (“Вельс” и “Геотермист”) при обеспечении соответствия требованиям ТЗ по радиационной стойкости.

5. Аппаратно-программный комплекс ФК ПЛИС на основе которого разработана и утверждена в качестве базовой, методика функционального контроля ПЛИС внедрены в ОАО “ЭНПО СПЭЛС” при проведении исследований ПЛИС на моделирующих установках и имитаторах.

6. Результаты исследований вошли в отчетные материалы работ по проектированию космической аппаратуры систем МКС, “Глонасс”, “Ресурс-П”, “Лиана”, “Персона”, “Бел-КА”, “KazSat-2”, “Луч-5Б”.

В результате работы над диссертацией поставленные цели достигнуты.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Бобровский, Д.В. Радиационная стойкость микропроцессоров семейства “МЦСТ-R” / Д.В. Бобровский, В.С. Волин, О.А. Калашников, П.В. Некрасов, Ю.С. Рябцев // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ. - М.: ОАО “ЦНИИ”Электроника”, 2010.- С.102-113
2. Артамонов А.С. Моделирование эффектов воздействия радиации на пьезорезистивные датчики механических величин / А.С. Артамонов, Д.В. Бобровский, Д.В. Бойченко, А.А. Демидов, А.Ю. Никифоров, О.А. Калашников, В.А. Полунин, А.И. Шереметьев //Датчики и Системы.- 2010. -№3.- С23-27
3. Бобровский, Д.В Исследование дозовых радиационных эффектов ПЛИС Xilinx / Д.В. Бобровский, О.А. Калашников // Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость-2007 Научно-технический сб. - М.:МИФИ, 2007.- С.203-205.
4. Бобровский, Д.В. Оценка радиационной стойкости микросхем Altera / Д.В. Бобровский // Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научных трудов. Т1. - М.:МИФИ, 2007.- С.150-151.
5. Бобровский, Д.В. Оценка радиационной стойкости ПЛИС ф. Xilinx / Д.В. Бобровский //Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научных трудов.- М.:МИФИ, 2007. - С.268-271.

6. Бобровский, Д.В. Исследование радиационной стойкости ПЛИС семейства SPARTAN2 и конфигурационных ПЗУ семейства XC18V/ Д.В. Бобровский // Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость - 2008 Научно-технический сб. - М.:МИФИ, 2008.- С.71-72.
7. Бобровский, Д.В. Методы оценки сечения одиночных сбоев устройств на базе ПЛИС / Д.В. Бобровский // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научных трудов.- М.:МИФИ, 2008. - С.199-203.
8. Бобровский, Д.В. Оценка чувствительности ПЛИС Xilinx к воздействию отдельных ядерных частиц /Д.В. Бобровский // Научная сессия МИФИ-2009. Сб. научных трудов. ТП. - М.:НИЯУ МИФИ, 2009.- С. 112-114
9. Бобровский, Д.В. Экспериментальная оценка сечения одиночных сбоев ПЛИС XCV300 при воздействии отдельных ядерных частиц /Д.В. Бобровский // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научных трудов.- М.:МИФИ, 2009. - С.287-293.
10. Бобровский, Д.В. Оценка радиационной стойкости однократно программируемых ПЛИС ф. Actel семейства Axcelerator /Д.В. Бобровский // Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость - 2009 Научно-технический сб. - М.:МИФИ, 2009.- С.25-26.
11. Бобровский, Д.В. Методика тестирования функциональных узлов ПЛИС при оценке радиационной стойкости / Д.В. Бобровский, П.В. Некрасов // Научная сессия МИФИ-2009. Сб. научных трудов. ТП. - М.:НИЯУ МИФИ, 2010.- С. 153-156
12. Ахметов, А.О. Оценка надежности методов функционального контроля микропроцессорных СБИС / А.О. Ахметов, Д.В. Бобровский, О.А. Калашников, П.В. Некрасов // Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость - 2010 Научно-технический сб. - М.:НИЯУ МИФИ, 2010.- С.161-162.
13. Ахметов, А.О. Оценка радиационной стойкости ПЛИС EPF10K50ф. Altera с использованием методики независимого функционального контроля / А.О. Ахметов, Д.В. Бобровский, О.А. Калашников, П.В. Некрасов // Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость - 2010 Научно-технический сб. - М.:НИЯУ МИФИ, 2010.- С.31-32.
14. Ахметов, А.О. Система контроля работоспособности функционально сложных интегральных микросхем при проведении радиационных исследований/ А.О. Ахметов, Д.В. Бобровский, П.В. Некрасов // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научных трудов.- М.:НИЯУ МИФИ, 2010. -С.258-265.

Бобровский Дмитрий Владимирович
Методы и средства прогнозирования стойкости ПЛИС к воздействию радиационных факторов
космического пространства.

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата тех. наук.

Подписано в печать _____ Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография