

На правах рукописи

НЕКРАСОВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ
СТОЙКОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СБИС

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2010 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: ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России»

Защита состоится 17 мая 2010 г. в 16 час. 00 мин.

На заседании диссертационного совета Д212.130.02

в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете)

по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-76

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан 16 апреля 2010 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 развития методов, разработки методики и аппаратных средств функционального контроля микропроцессорных сверхбольших интегральных схем (МП СБИС), таких как микропроцессоры (МП) и микроконтроллеры (МК), в процессе проведения радиационных испытаний с целью прогнозирования их радиационного поведения в реальных условиях эксплуатации.

Актуальность темы диссертации

На этапе современного развития электроники приоритет в области работы с информацией отдается цифровым схемам, что определено неоспоримыми преимуществами цифровой обработки данных. Технические и эксплуатационные характеристики перспективных систем управления и контроля во многом обусловлены техническим уровнем входящих в их состав МП СБИС – электронных узлов, реализующих функции управления и обработки информации. Требования, предъявляемые к аппаратуре и элементной базе систем управления специального назначения (ракетно-космической техники, систем связи, физического эксперимента и т.д.), определяют условия их эксплуатации при наличии радиационных внешних воздействующих факторов. При этом наиболее важным элементом системы является процессорная часть устройства, входящая в состав и управляющая работой как каждого блока специализированной аппаратуры в отдельности, так и устройства в целом. В связи с чем актуальной является задача прогнозирования радиационной стойкости микропроцессорных СБИС работающих в условиях внешних воздействующих радиационных факторов, с использованием экспериментальных методов. С развитием микропроцессорных систем, к которым относятся микропроцессорные СБИС, увеличивается степень интеграции, рабочая частота, расширяется номенклатура функциональных блоков, появляются новые возможности. Вместе с тем, в значительной степени возрастает сложность их тестирования при достоверном определении уровня радиационной стойкости.

Сбои и отказы микропроцессорных СБИС следует разделять на два вида: параметрические и функциональные. К параметрическим отказам можно отнести отказ за счет изменения характеристик базовых элементов и структур процессора (транзистор, ячейка памяти, выходной каскад и др.) и, как следствие, изменение характеристик микросхемы: изменение выходных напряжений, увеличение статического и динамического токов потребления, деградация временных параметров (время выборки, задержки распространения сигнала). К функциональным сбоям и отказам относят все те виды потери работоспособности,

которые влияют или потенциально могут повлиять на реализацию алгоритма работы отдельного функционального блока или всего устройства. К ним относятся сбои/отказы в комбинационных схемах или потеря информации в ячейках памяти СБИС. Очевидно, что с ростом функциональной сложности МП СБИС возрастает и сложность построения процедуры ее функционального контроля (ФК).

Задачи параметрического контроля МП, как правило, не являются специфическими – измерение статических и динамических токов потребления, выходных напряжений, предельных частот, задержек и т.д. выполняется теми же методами и техническими средствами, что и для других классов микросхем. В то же время ФК представляет собой сложную, специфическую задачу, поэтому реализация достоверной проверки работоспособности микропроцессорной системы является наиболее сложным и трудоемким процессом при подготовке и проведении радиационных испытаний (РИ) МП СБИС. Это связано, во-первых, с разнообразием типов, разновидностей, архитектур современных МП СБИС, большим количеством внутренних функциональных блоков: внутренняя память (кэш-память, память программ и данных), регистры общего назначения (РОН), арифметико-логическое устройство (АЛУ), блоки ЦАП, АЦП, контроллеры интерфейсов, таймеры/счетчики, внутренние контроллеры, осуществляющие работу процессорного ядра – контроллер прерываний, прямого доступа в память, сопроцессоры, и т.д.. Поэтому разработка средств и методов ФК предполагает индивидуальный подход с учетом особенностей конкретных микросхем, характеризующихся алгоритмом функционирования, разрядностью данных при информационном обмене и выполнении функций, объемом адресного пространства, особенностями управления, интерфейсами информационного обмена и др. Во-вторых, за счет большого количества внутренних функциональных блоков и, как следствие, внутренних состояний исследуемого автомата, исключается возможность контроля МП СБИС путем простого перебора.

Для осуществления функционального контроля МП (МК), необходимо составить программу самоконтроля работоспособности его внутренних блоков, осуществить вывод и хранение информации об отказе (сбое), изменять алгоритм тестирования в зависимости от типа радиационного воздействия. Современные функционально сложные СБИС работают на высоких частотах (от десятков до сотен мегагерц), что предъявляет дополнительные требования к аппаратуре ФК по ресурсам и быстродействию.

В настоящее время преобладает мнение, что доминирующими радиационными эффектами в МП СБИС являются параметрические отказы, что определяется высокой степе-

нью интеграции и, следовательно, значительным интегральным вкладом в характеристики СБИС даже небольших изменений характеристик базового элемента (транзистора). Из этой предпосылки следует выбор критериальных параметров, определяющих стойкость МП СБИС – статического и динамического токов потребления и напряжений выходных логических уровней. На контроле этих параметров базируется большинство существующих методик радиационных экспериментов. Такие методики предполагают также проведение упрощенного ФК, характеризующегося низкой вероятностью обнаружения функциональных отказов.

Большое количество проведенных, в том числе автором, радиационных испытаний МП СБИС показывает, что во многих случаях именно функциональные отказы являются доминирующими и определяют уровень радиационной стойкости МП СБИС. Поэтому методики радиационных испытаний МП СБИС должны в обязательном порядке включать развернутые процедуры ФК, обладающие высокой диагностической способностью. Вместе с тем, реализация такой процедуры для каждой конкретной МП СБИС – разработка специализированной аппаратуры, адаптация и настройка систем управления и контроля работоспособности МП СБИС с учетом всех архитектурных особенностей, написание программ тестирования всех функциональных блоков с учетом специфики воздействия, – является чрезвычайно сложной научной и инженерной задачей, требующей неприемлемых временных затрат. Второй проблемой проведения полного ФК МП СБИС является чрезмерно большое время выполнения самой процедуры ФК (на порядки превышающее время облучения), что не позволяет использовать такие методики ФК в реальном радиационном эксперименте.

В связи с этим актуальной является задача радикального сокращения, как времени подготовки ФК МП СБИС, так и времени проведения процедуры ФК, без потери достоверности обнаружения функциональных отказов. Решение этой задачи основывается на исследовании закономерностей радиационного поведения МП СБИС, разработке эффективных методов, алгоритмов, методик и аппаратно-программных средств ФК при проведении радиационного эксперимента, на что и направлена диссертация.

Состояние исследований по проблеме. Вопросам функционального контроля МП СБИС при проведении радиационных испытаний посвящены многочисленные работы. О.А. Калашникова, А.А. Демидова (кафедра 3, НИЯУ МИФИ); И.И. Шагурина, А.В. Лебедева (кафедра 27, НИЯУ МИФИ); В.С. Анашина, П.А. Чубунова (РНИИ Космического

приборостроения), М.Н. Дубнова, А.В. Сацко, В.В. Синельникова, А.С. Сырова, П.А. Харитоновна, (ФГУП МОКБ «Марс»); А.И. Янькова, В.К. Зольникова (ФГУП НИИ Электронной техники); Б.В. Василегина, П.Н. Осипенко, А.Г. Дубровского (НИИСИ РАН) и других специалистов.

Так, в работах О.А.Калашникова и А.А.Демидова приведены многочисленные экспериментальные результаты радиационных испытаний МП СБИС. В работах И.И.Шагурина и А.В.Лебедева представлена методика, аппаратные средства для проведения радиационных испытаний МК .

В тоже время, многие важные методические вопросы достоверного оперативного ФК МП СБИС и определения уровня их радиационной стойкости до сих пор проработаны недостаточно. Не обоснован выбор функциональных блоков для тестирования МП СБИС в процессе проведения радиационного эксперимента, не сформированы методики тестирования периферийных функциональных блоков в том числе интерфейсных (UART, USB, SPI, TWI и др.) и аналоговых (АЦП, ЦАП, компараторы) входящих в состав современных МП СБИС. Не обосновано определение ограничений на время функционального теста в процессе проведения функционального контроля с учетом эффектов отжига. Не определена связь функционирования МП СБИС, в зависимости от изменения параметров микросхемы (ток потребления). Так же предложенная ранее соответствующая аппаратура ФК ориентирована в основном либо на применение в ходе производства и практически неприменимы в радиационных экспериментах, либо разработана инженерами соответствующей научной группы без наличия поддержки, соответствующей документации и не является универсальной для применения в других научных группах.

В частности, большинство научных работ и публикаций на тему ФК МП при радиационных исследованиях не затрагивает вопросы достоверности и фактически описывает контроль параметров отдельно выбранных функциональных блоков. Имеющиеся на момент начала работы аппаратно-программные средства радиационного эксперимента не обеспечивали возможности полноценного автоматизированного управления, функционального контроля и диагностирования отказов и сбоев в активных динамических режимах работы МП в реальном времени непосредственно в процессе облучения.

Таким образом, возникла необходимость: структурировать методы ФК МП СБИС, определить метод достоверного оперативного ФК, в процессе радиационных испытаний МП СБИС для разных видов ионизирующих излучений (ИИ), разработать методику подготовки и проведения ФК микропроцессоров и микроконтроллеров, а так же разработку про-

граммно-аппаратных средств для контроля работоспособности современных МП и МК в условиях радиационного воздействия.

Цель диссертации: разработка научно обоснованных методических и технических средств определения функциональных отказов в микросхемах микропроцессорных СБИС при исследовании их радиационной стойкости.

Основными задачами диссертации являются:

- Анализ и экспериментальные исследования закономерностей доминирующих функциональных отказов микропроцессорных СБИС и их элементов при различных видах радиационных воздействий.

- Анализ и развитие существующих методов функционального контроля микропроцессорных СБИС, оценка эффективности каждого метода.

- Совершенствование существующих и разработка новых методических и технических средств радиационных испытаний микропроцессорных СБИС, обеспечивающих гибкое управление, выявление и диагностирование сбоев и отказов в реальном времени непосредственно в процессе радиационного воздействия;

- Получение и систематизация оригинальных экспериментальных данных, устанавливающих общность радиационного поведения микропроцессорных СБИС в широких диапазонах изменения режимов работы и уровней воздействия.

Научная новизна работы:

1. Выявлены, описаны и систематизированы основные закономерности и доминирующие механизмы функциональных отказов микропроцессорных СБИС и их базовых элементов при радиационном воздействии.
2. Предложен метод «Выборочного функционального контроля» микропроцессоров и микроконтроллеров, позволяющий оперативно в условиях проведения радиационного эксперимента получить достоверный результат.
3. Предложены методики тестирования функциональных блоков микропроцессорных СБИС для разных видов радиационного воздействия.
4. Предложен метод повышения точности определения уровня функциональных сбоев/отказов на 10% в зависимости от характерного поведения параметров СБИС.
5. Разработана методика проведения радиационного эксперимента с учетом особенностей СБИС, типа установки, вида и характеристик воздействия.

1. **Практическая ценность** работы заключается в разработке методических и технических средств, обеспечивающих функциональный контроль микропроцессорных СБИС при проведении радиационных исследований. Предложена структура и реализован универсальный аппаратно-программный комплекс, позволяющий производить полноценный функциональный контроль современных микропроцессорных СБИС на предельных частотах. Комплекс реализован на основе оборудования фирмы National Instruments с использованием широко применяемого программного обеспечения LabView. Оптимизацию при подготовке эксперимента обеспечивает разработанная библиотека универсальных виртуальных приборов для параметрического и функционального контроля микропроцессорных СБИС, а также для управления радиационными установками.
2. Предложена методика функционального контроля микропроцессорных СБИС, учитывающая вид радиационного воздействия и определяющая выбор режима облучения в зависимости от времени функционального контроля и параметров радиационной установки.
3. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований более чем 50 микропроцессоров и микроконтроллеров отечественного и иностранного производства (ОАО «Ангстрем», НИИСИ РАН, НТЦ «Модуль», ЗАО «МЦСТ», ЗАО «ПКК Миландр», ФГУП «НИИЭТ», ГУП НПЦ «ЭЛВИС», НТЦ «Белмикросистемы», IDT, Atmel, Analog Devices, Texas Instruments, Infineon, Microchip, Intel и др.).

Разработанные средства внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при проведении исследований микропроцессорных СБИС на моделирующих установках и имитаторах.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Метод выборочного функционального контроля микропроцессорных СБИС, который предполагает разделение функциональных блоков микропроцессора на группы по степени восприимчивости к радиационному воздействию и осуществлению дифференцированного подхода к реализации функционального контроля для каждой из групп. На стадии предварительного анализа архитектурно-технологической организации СБИС проводится выбор узлов, потенциально наиболее чувствительных к заданным видам ионизирующего излучения, и в ходе испытаний наиболее полно контролируется работоспособность именно этих узлов. В то же время остальные узлы микропроцессорных СБИС контролируются в одном из наиболее критических режимов. Применение данного метода существенно снижает объем тестирования без потери достоверности результатов.
2. Методика функционального тестирования микропроцессорных СБИС с учетом особенностей функционального контроля при проведении радиационных исследований для разных видов радиационного воздействия.
3. Метод повышения точности определения уровня функциональных сбоев/отказов до 10% в зависимости от характерного поведения параметров СБИС.
4. Методика выбора интервалов облучения микропроцессорных СБИС при дозовом воздействии, позволяющая минимизировать интервал неопределенности уровня стойкости СБИС до уровня погрешности дозиметрии.
5. Аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий гибкое управление, а также полноценный функциональный и параметрический контроль работоспособности МП СБИС в реальном времени, в активных динамических режимах работы непосредственно в процессе радиационного воздействия.
6. Оригинальные результаты экспериментальных исследований радиационного поведения МП СБИС, подтверждающие обоснованность предложенных методических и технических средств прогнозирования функциональных сбоев.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на 9-ой всероссийской конференции «Пути обеспечения современной радиоэлектронной аппаратуры высоконадежной электронной компонентной базой» (Санкт-Петербург, 2009 г.); российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2003-2009 гг.); научных сессиях МИФИ (Москва, 2004-2009 гг.); на научных конференциях

“Электроника, микро– и наноэлектроника” (г.Кострома 2003 г., г.Н.Новгород 2004 г., г.Вологда 2005 г., г.Гатчина 2006 г., г. Пушкинские Горы 2007 г., г. Петрозаводск 2008 г., г.Н.Новгород 2009 г.); на VI научно-практическом семинаре «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур» (г.Н.Новгород, 2006 г.). Основные результаты диссертации опубликованы в 26 работах (в период с 2003 по 2009 гг.), в том числе 8 без соавторов.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 120 страниц, в том числе 54 рисунка, 15 таблиц, список литературы из 102 наименований и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

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

Первая глава посвящена анализу проблемной ситуации в области функционального контроля МП СБИС в процессе проведения радиационного эксперимента. Описываются типовая структура, особенности построения современных МП СБИС, радиационные эффекты и, как следствие, функциональные отказы и сбои, возникающие в МП и МК при различных видах радиационного воздействия. Приведены результаты экспериментальных исследований современных МП СБИС, применяемых в аппаратуре специального назначения, обоснована постановка задач исследований.

Вторая глава содержит описание существующих методов и средств радиационных испытаний МП СБИС, анализ достоверности результатов, полученных разными методами. В главе определено научное противоречие, связанное с необходимостью и в то же время невозможностью проведения полного ФК МП и МК в процессе проведения радиационного эксперимента. Предложен метод выборочного (адаптивного) ФК, оптимизированный по достоверности функционального контроля МП СБИС и в то же время применимый в процессе проведения радиационного эксперимента.

Третья глава содержит описание практических результатов сравнения эффективности и достоверности использования различных методов ФК МП СБИС при проведении радиационных испытаний. Обоснованно использование метода выборочного ФК, позволяющего получать наиболее достоверный результат радиационной стойкости МП СБИС, отличающийся в некоторых случаях в несколько раз от результатов, полученных другими методами.

В четвертой главе на основе проведенного анализа и с учетом ограничений, налагаемых процедурой радиационного эксперимента, сформулированы требования для аппарату-

ры ФК МП и МК. Описан реализованный автором блок функционального контроля (БФК) МП СБИС на базе ПЛИС Xilinx, удовлетворяющий основным требованиям и позволяющий проводить полноценный функциональный контроль МП и МК на предельных частотах. В рамках поставленной задачи был разработан стенд для ФК МП СБИС в базисе встраиваемых систем фирмы National Instruments и программного обеспечения LabView, полученная система позволяет проводить полноценный ФК МП СБИС, интегрировать приборы экспериментального стенда в единый программно-аппаратный комплекс функционального и параметрического контроля.

Пятая глава посвящена разработке методики проведения эксперимента при исследовании параметров радиационного поведения МП СБИС, выбора режимов облучения, определения характерных уровней воздействия, определение связи поведения параметров СБИС с ее функционированием.

Заключение обобщает основные теоретические и практические результаты диссертации.

Содержание диссертации

Спецификой современных МП СБИС является их функциональная сложность и высокая степень интеграции, вследствие чего причины радиационных отказов современных МП и МК могут быть совершенно различными. Это усложняет процедуру радиационных испытаний МП СБИС. ФК при радиационных испытаниях имеет ряд существенных особенностей:

- 1) по сравнению с процедурами ФК других микросхем, которые в большинстве случаев реализованы как последовательности тестовых векторов (для микросхем ОЗУ – алгоритмические функциональные тесты), ФК МП СБИС предполагает загрузку программного обеспечения, реализующего алгоритмы тестирования, с контролем хода и результата их выполнения;
- 2) процедуры ФК специфичны для каждого МП и МК, что обусловлено различием архитектур, систем команд, составом и функциональными возможностями их узлов и блоков;
- 3) 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.

Специфика радиационных испытаний в части требований к используемым методам и техническим средствам контроля работоспособности заключается в следующем:

- 1) наличие полей ИИ (и сопутствующих электромагнитных помех) определяет необходимость защиты аппаратуры ФК;
- 2) в большинстве случаев ограничено время выполнения процедуры ФК (или одного полного цикла ФК);
- 3) конструктивные особенности источников ионизирующего излучения.

Таким образом, актуальной является задача выбора (а при необходимости – разработки) методических и технических средств ФК МП СБИС в ходе радиационных испытаний. Анализ этой задачи начнем с рассмотрения существующих методов ФК МП СБИС, используемых при радиационных испытаниях. Определим границы применимости каждого метода их основные достоинства и недостатки.

Метод упрощенного ФК.

Современные МП имеют высокую степень интеграции и могут содержать в себе до 10^8 транзисторов на кристалле, поэтому даже незначительное увеличение сквозного тока каждой комплементарной пары транзисторов дает значительное увеличение суммарного тока потребления СБИС. На этом основано предположение о том, что параметрические сбои и отказы возникают раньше функциональных и являются доминирующими. Следовательно, процедура ФК – наиболее трудоемкая часть подготовки и проведения испытаний МП СБИС, – не является существенной и может быть реализована упрощенно, с минимальными затратами. На входы СБИС подаются статические логические уровни и тактовый сигнал с заданной частотой, при этом на одном из выходов контролируется детерминированная временная диаграмма, по которой и определяется результат ФК. Показано, что расплатой за простоту является минимальная информативность и невозможность спрогнозировать радиационное поведение МП СБИС в реальных режимах их работы.

Метод ФК в составе реального устройства.

При использовании метода ФК МП СБИС в реальном режиме функционирования испытания проводятся в составе реального устройства (материнской платы), для тестирования используется программа, по которой МП(МК) будет работать в реальных условиях. В работе показано, что недостатком такого подхода является относительная применимость результатов испытаний к тому же МП(МК), работающему в другом устройстве и по другой программе, а также трудности с контролем хода ФК и регистрацией результатов. Метод

является узкоспециализированным и нестандартным решением для каждого МП или МК. Для стандартизации и унификации процедуры ФК МП СБИС был предложен метод псевдодинамического ФК.

Метод псевдодинамического ФК.

подавляющее большинство современных МП СБИС, таких как МП и МК, содержат в своем составе стандартные модули внутрисхемной отладки и периферийного сканирования JTAG (или подобные). С учетом этой особенности существует возможность реализации стандартного решения (алгоритма ФК), применимого для широкого класса МП СБИС. Метод псевдодинамического ФК как правило реализуется с помощью персонального компьютера (ПК), содержащего JTAG-эмулятор.

Показано, что недостатком данного метода является сложность реализации заданных параметров временных диаграмм и реальной частоты переключения узлов СБИС. Типовые частоты тестирования в случае применения метода псевдодинамического ФК составляют 10...100 кГц, в то время как типовые тактовые частоты современных МП – 10...1000 МГц. Снижение тактовой частоты существенно сказывается на результатах ФК в частности при дозовом воздействии, т.к. в первую очередь могут деградировать временные параметры исследуемой СБИС.

Метод полного ФК.

Метод полного ФК реализуется либо проектированием специализированного устройства для ФК данного МП (МК), которое должно проводить полное тестирование на предельных частотах, либо с использованием промышленных аппаратно-программных комплексов (тестеров), таких как HP83000 (Aligent Technologies), Formula-2000 (ГК ФОРМ). При использовании данного метода тестовая программа должна состоять из набора подпрограмм, тестирующих функциональные блоки МП СБИС. В работе показано, что полный ФК современных МП на промышленных тестерах может занимать десятки минут или даже часы на один образец, что не исключает возможность радиационного отжига. Кроме того, используемая в таких случаях аппаратура ФК конструктивно несовместима с радиационными установками, что требует реализации пошаговой процедуры облучения-контроля, резко снижающей достоверность результатов испытаний.

ФК с использованием метода формирования тестовых наборов команд.

Метод формирования тестовых наборов команд с помощью таблицы покрытия, которая указывает участие функциональных блоков в выполнении каждой команды, входящей в состав формируемых тестовых программ. Таблица покрытия позволяет определить,

насколько полно разработанный набор программ обеспечивает тестирование основных функциональных блоков тестируемого микроконтроллера. Таблица покрытия показывает, насколько разработанный комплект ТП обеспечивает покрытие (тестирование) всех ФБ данного МК. Для каждого ФБ определяется коэффициент покрытия, который указывает кратность использования данного ФБ в тестовых программах:

$$K_p = N_t / N_o, \quad (3.1)$$

где N_o – число команд из набора, выполняемого МК, в которых участвует данный ФБ, N_t – число различных команд в разных тестовых последовательностях, в которых используется данный ФБ. Полное тестирование обеспечивается, если для каждого ФБ получено значение $K_p \geq 1$. Для повышения достоверности локализации отказов желательно обеспечить значения $K_p > 2$. Тестовые программы должны содержать полный набор команд испытываемого МК, тогда обеспечивается значение $K_p \geq 1$ для всех ФБ. Данный метод позволяет получить критерий для определения глубины функционального контроля, достаточно точно выявить отказавший функциональный блок, но в то же время, является полным функциональным контролем процессорного ядра и не учитывает возможность возникновения радиационных эффектов во всех примитивах функционального блока, т.к. ограничивается выполнением всех операций затрагивающих конкретный функциональный блок в пределе по 1 разу, что не является достаточным для его ФК.

Метод выборочного/адаптивного ФК.

Все рассмотренные ранее методы ФК МП СБИС при радиационных испытаниях имеют не только преимущества, но и существенные недостатки, ограничения по использованию. Показано, что эффективным является компромиссный метод, позволяющий сочетать достаточную полноту, информативность ФК МП на рабочих частотах с относительной простотой подготовки испытаний и небольшим временем выполнения тестовых процедур. В работе предложен метод выборочного ФК, который является модульным подходом, т.е. основан в первую очередь не на выполнении набора операций процессора, а предполагает тестирование соответствующего функционального блока с использованием программы учитывающей возможное возникновение в нем радиационных эффектов. На этапе анализа архитектурно-технологической организации СБИС производится разделение ее функциональных блоков на группы по степени восприимчивости к радиационному воздействию, в результате которого осуществляется дифференцированный подход к реализации функционального контроля для каждой из групп. Для потенциально наиболее чувствительных бло-

ков, к заданным видам ионизирующего излучения, реализуется наиболее полный функциональный контроль, что позволяет выявить функциональный отказ блока на самом раннем этапе. В то время, как остальные блоки контролируются не полностью, а в одном или нескольких наиболее критических режимах работы с учетом вида радиационного воздействия. При этом, исходя из требований по времени на подготовку эксперимента и непосредственно времени ФК при проведении радиационного эксперимента, для полной проверки выделяется соответствующее количество внутренних блоков МП СБИС по степени восприимчивости. В процессе проведения эксперимента, исходя из полученных результатов, производится коррекция программы ФК, при этом некоторые блоки могут быть переведены в разряд восприимчивых и тестироваться максимально полно, в то время, как другие блоки могут быть переведены в разряд потенциально стойких, с усечением их программы функционирования.

В работе предложена методика выбора потенциально радиационно-чувствительных узлов МП СБИС, который производится как по результатам предварительного анализа архитектуры и технологии МП(МК), так и по данным о радиационных отказах аналогичных МП СБИС. Для этого используются, как многочисленные внешние базы данных по радиационной стойкости, так и результаты испытаний, проведенных при участии автора (более 50 типов отечественных и иностранных МП и МК).

Показано, что в большинстве случаев наиболее чувствительными узлами МП СБИС являются блоки внутренней памяти:

- кэш-память ОЗУ для микропроцессоров;
- модули флэш-памяти для микроконтроллеров.

Чаще всего эти модули отвечают за хранение программы функционирования, при этом отказ может произойти как по сохранности информации, так и по возможности ее перезаписи. В случае загрузки во внутреннюю память программы мы не получаем возможности полного функционального контроля данного блока, т.к. прошивка сформирована компилятором и не учитывает контроля радиационных эффектов. В многих современных МП СБИС существует возможность командного доступа в память программ, это позволяет реализовать полноценный функциональный контроль, т.е. реализацию тестов памяти с учетом возможных отказов в зависимости от вида радиационного воздействия. Для определения стойкости внутренней памяти программ предлагается использовать режим работы с внешней памятью для МК, либо хранение программы во внешней памяти в некэшируемой области адресного пространства для МП. При этом внешняя память программ будет

защищена от ИИ, и появится возможность оценить работу всех блоков СБИС, даже при отказе во внутренней памяти программ. В случае невозможности использования внешней памяти программ следует стандартными средствами программирования (программаторы, эмуляторы) осуществлять тестирование модулей памяти на наличие отказов.

Основываясь на предположении, что блоки одинакового функционального назначения конкретной СБИС (банки модуля памяти, таймеры счетчики, контроллеры внешних прерываний и др.) реализованы структурно-технологически идентично, предложено проводить ФК таких блоков параллельно, с использованием различных программ функциональных тестов дополняющих друг друга, при этом время полного функционального контроля можно сократить для данного вида блоков в кратное число раз.

В работе приведены результаты выполненных автором сравнительных исследований различных МП СБИС с использованием описанных выше методов.

В работе представлены сравнительные результаты применения методов упрощенного и выборочного ФК при радиационных испытаниях МК 1887BE1У (ФГУП "НИИЭТ"). Методика упрощенного ФК реализована в точном соответствии с Техническими Условиями на микросхему: на вход сброса подавался периодический сигнал и контролировалось изменение состояния выходов. При выборочном ФК была разработана тестовая программа, контролирующая работу следующих блоков: пользовательского ОЗУ, FLASH-памяти программ, таймера-счетчика, АЛУ, блока прерываний и портов ввода/вывода. Контроль функционирования проводился с использованием специализированного устройства, реализованного в базе БФК-05 [2].

В результате сравнительных исследований установлено, в частности, что при гамма-импульсном ИИ уровень бессбойной работы, определенный методом выборочного ФК, оказался на порядок ниже, чем в методом упрощенного ФК, и определялся сбоями в регистрах специального назначения, проявлявшихся в виде снижения частоты выполнения операции в 8 раз. При дозовом облучении уровень стойкости, определенный методом выборочного ФК, оказался в 1,5 раза ниже, чем методом упрощенного ФК, и определялся сбоем в FLASH-памяти программ. При этом МК прекращал нормальное функционирование, а повторное перепрограммирование не приводило к положительному результату. Важно отметить, что значение тока потребления оставалось в рамках допустимых значений – доминировал функциональный отказ. На этом и ряде других примеров обоснована недопустимость использования упрощенной методики ФК.

Также в ходе радиационных исследований микропроцессора 1890BM1 (НИИСИ РАН) использовались методы упрощенного, полного и выборочного ФК. Подтверждена эффективность метода выборочного ФК, как при гамма-импульсном, так и при дозовом воздействии – в обоих случаях применение этого метода позволило выявить отказы на более низких уровнях радиационного воздействия (см. табл.1.).

Таблица 1. Сравнение уровней воздействия при испытаниях МП 1890BM1 с использованием различных методов ФК.

Метод тестирования	УБР по функционированию	
	При импульсном воздействии	При стационарном воздействии
Упрощенный метод	$5,7 \cdot 10^9$ ед/с	$>6,0 \cdot 10^4$ ед (не обнаружен)
Метод полного ФК	–	$>6,0 \cdot 10^4$ ед (не обнаружен)
Метод выборочного ФК	$4,4 \cdot 10^9$ ед/с	$4,8 \cdot 10^4$ ед

Наличие завышенных значений по стойкости при полном функциональном контроле объясняется отжигом МП за время транспортировки СБИС до места проведения ФК. Суммарное время отжига составляло от нескольких часов, до нескольких суток.

При исследовании радиационной стойкости МП IDT79R3081 ФК производился двумя методами:

1) Упрощенный ФК. Контроль управляющих сигналов по заданной диаграмме.

2) Выборочный ФК. Контроль АЛУ, РОН, КЭШ память данных, КЭШ память команд.

При этом уровень стойкости при упрощенном ФК практически на порядок превышал уровень стойкости при выборочном функциональном контроле (см. табл. 2). На рисунке 1 изображен график зависимости динамического тока потребления МП IDT79R3081 от уровня накопленной дозы. На графике приведены уровни функционального отказа СБИС при проведении исследований методом выборочного и упрощенного ФК, также отмечен уровень параметрического отказа.

Анализ этих и других результатов позволил сделать вывод об эффективности метода выборочного ФК МП СБИС при радиационных испытаниях.

Таблица 2. Сравнение уровней воздействия при испытаниях МП IDT79R3081 с использованием различных методов ФК.

Метод тестирования	УБР по функционированию при стационарном воздействии
Упрощенный метод	$4,8 \cdot 10^4$ ед
Метод выборочного ФК	$7,2 \cdot 10^3$ ед

Для реализации предложенного метода было необходимо разработать универсальный стандартный аппаратно-программный комплекс для проведения радиационных испытаний

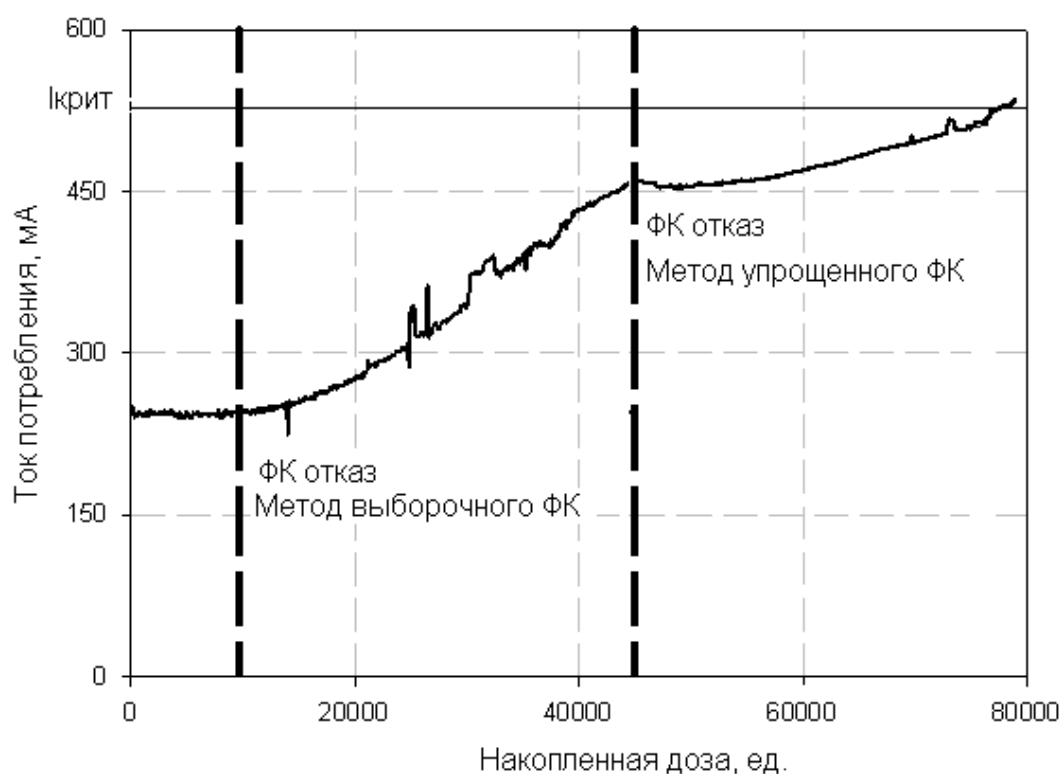


Рис. 1. График зависимости тока потребления МП IDT79R3081 от уровня накопленной дозы.

МП СБИС. В работе сформулированы и обоснованы технические требования к аппаратно-программным средствам ФК, учитывающим, как специфику радиационного эксперимента, так и особенности широкой номенклатуры современных МП СБИС. Определены необходимые параметры быстродействия, разрядности, напряжений питания и уровней логических сигналов, требования по управлению ФК, конструктивно-технологические требования.

С учетом сформулированных требований была предложена реализация аппаратно-программного комплекса на базе аппаратуры фирмы National Instruments (NI) с использованием программного обеспечения LabView. Показано, что 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.

При исследовании радиационного поведения МП СБИС предполагается тестирование наиболее важных функциональных узлов, к которым можно отнести FLASH-память, ОЗУ,

ПЗУ, АЛУ, регистры и др. Также существует необходимость проводить контроль второстепенных по уровню радиационной восприимчивости модулей СБИС и, по возможности, сделать эту процедуру универсальной для широкого класса МП СБИС. В результате анализа архитектуры современных микропроцессорных систем, из всей номенклатуры функциональных модулей автором выделен ряд интерфейсных блоков, отвечающих за обмен данными с внешними устройствами, которые обладают унифицированной структурой и протоколами обмена (UART, SPI, JTAG, I2C, USB и др.), что позволяет создать универсальные модули для их тестирования.

Разработана структура модуля тестирования периферийного интерфейсного блока, который состоит из 3 частей (Рис.2.):

- интерфейсный модуль реализует режимы (прием/передача информации) работы блока с возможностью изменения параметров информационного обмена;
- тестовый модуль содержит набор специально разработанных тестовых векторов для различных видов радиационного воздействия и анализирует правильность выполнения тестовой программы;
- модуль управления осуществляет управление работой виртуального прибора, отвечает за обмен информацией с другими виртуальными приборами и центральной программой.

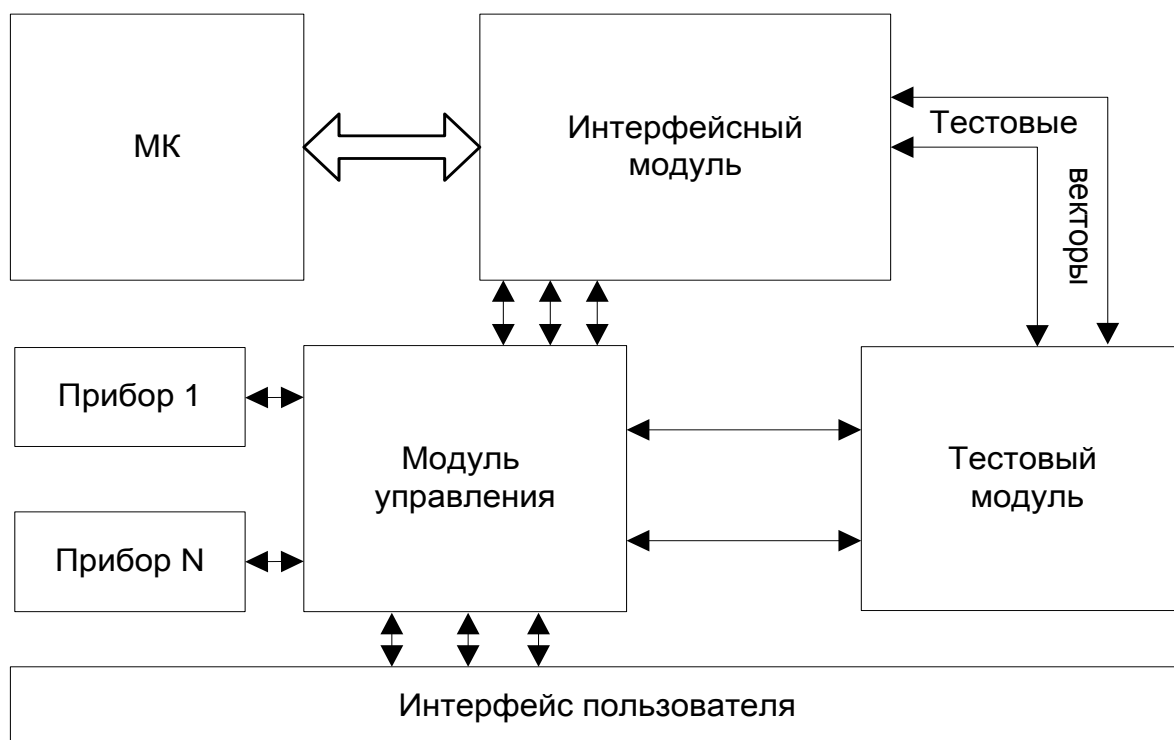


Рис. 2. Структурная схема контроллера тестирования интерфейса МП СБИС.

Контроллер тестирования входит в единую систему под управлением центральной программы, выполняющей задание режима, контроль функционирования каждого блока и реализацию интерфейса пользователя. На рис.2. представлена предложенная автором обобщенная структурная схема системы ФК МП СБИС при проведении радиационных испытаний. Следует отметить, что помимо виртуальных приборов позволяющих производить функциональный контроль, в ее состав входят виртуальные приборы параметрического контроля и блоки управления приборами, не входящими в состав аппаратуры NI, такими как осциллографы, мультиметры, сами источники облучения.

Экспериментально подтверждено, что разработанная система позволяет существенно упростить процедуру подготовки и проведения радиационных исследований. В настоящее время активно ведется работа по расширению номенклатуры виртуальных приборов тестирования интерфейсных блоков, разработке методики их тестирования с учетом вида радиационного воздействия, производится внедрение разработанного комплекса в стандартную процедуру проведения радиационного эксперимента функционально сложных микросхем.

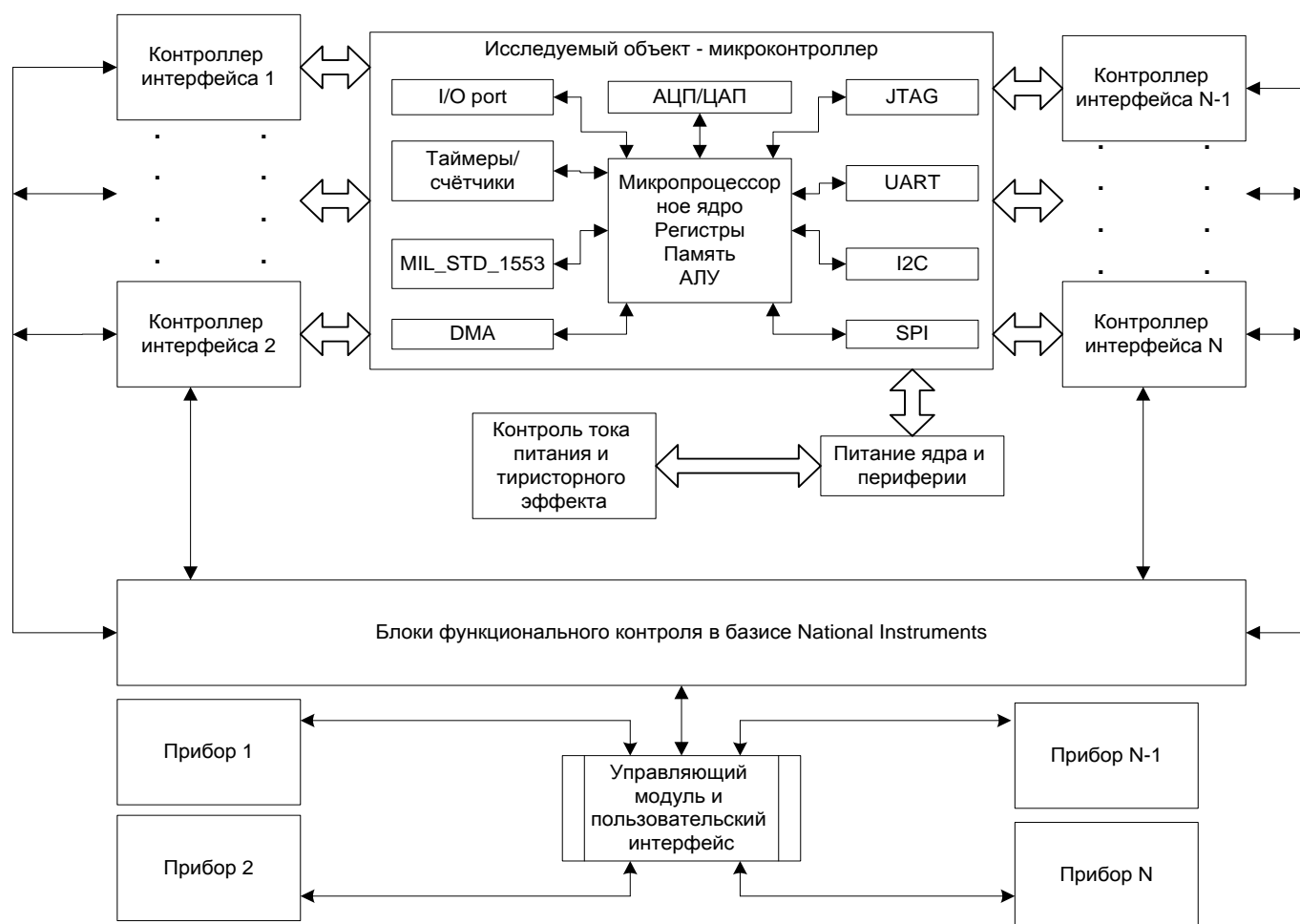


Рис. 3. Структурная схема реализации ФК МП СБИС

Для практической реализации метода выборочного ФК с учетом предложенной структуры аппаратно-программных средств автором разработана и апробирована практическая методика ФК МП СБИС при проведении радиационных испытаний, включающая следующие процедуры:

- 1) анализ архитектуры и структуры СБИС;
- 2) обзор конструктивно-технологических, структурных аналогов, выявление функциональных блоков, потенциально наиболее восприимчивых к воздействию радиации;
- 3) реализация аппаратно-программного комплекса для тестирования МП СБИС;
- 4) определение допустимого времени функционального контроля, исходя из характеристик установки и параметров МП СБИС.
- 5) реализация процедур максимально полного функционального контроля выбранных блоков;
- 6) реализация процедур упрощенного функционального контроля в наихудшем режиме потенциально стойких блоков;
- 7) написание тестовой программы;
- 8) определение условий проведения испытаний с учетом особенностей радиационного воздействия: точки параметрического контроля, выбор шагов облучения, определение уровней потенциального функционального сбоя;
- 9) облучение первого образца с контролем работоспособности в ходе облучения;
- 10) анализ полученных результатов, при необходимости перевод соответствующих ФБ из разряда стойких в разряд не стойких и наоборот – повтор процедур 5 - 8, испытания остальных образцов выборки по адаптированной программе.

Автором разработана методика выбора интервалов облучения микропроцессорных СБИС при дозовом воздействии, позволяющая минимизировать интервал неопределенности уровня стойкости СБИС до уровня погрешности дозиметрии. При определении времени функционального контроля и значений уровня накопленной дозы в которых будет проводиться остановка облучения, придерживаются утверждения, что время облучения $t_{\text{облуч}}$ должно более чем на порядок превышать время полного цикла тестирования $t_{\text{тест}}$, это определяется во-первых 10% погрешностью определения уровня функционального сбоя, во-вторых отжигом микросхемы во время измерения параметров без воздействия. Время полного цикла тестирования может занимать от нескольких секунд до нескольких минут и задается соотношением:

$$t_{\text{тест}} = (t_{\text{изм.пар.}} + t_{\text{фк}}),$$

а время облучения:

$$t_{\text{облуч.}} \geq 10 \cdot t_{\text{тест.}} \quad (1)$$

Таким образом, выражение для времени полного цикла тестирования при отсутствии априорной информации об уровне стойкости микросхемы будет зависеть от минимального уровня дозы $D_{\text{мин.}}$, определяемого экспертно для каждой ИС, который по сути и является первым интервалом облучения ΔD_0 :

$$t_{\text{облуч.}} = D_{\text{мин.}} / P$$

$$t_{\text{тест.}} \leq D_{\text{мин.}} / 10 \cdot P$$

Многочисленные экспериментальные результаты, полученные при участии автора, показывают, что при проведении радиационного эксперимента большое внимание следует уделить эффективному совмещению процессов облучения и контроля работоспособности МП СБИС. Частью методики стал предложенный автором подход к выбору интервалов облучения при дозовых испытаниях МП СБИС.

При облучении СБИС реальное значение накопленной дозы лежит в диапазоне погрешности дозиметрии радиационной установки, при этом необходимо производить оценку на наихудший случай. Поэтому интервал $[D - \delta D; D + \delta D]$, определяемый погрешностью, сужается до $[D - \delta D; D]$. Соседние интервалы не должны пересекаться (Рис. 3.а), но в то же время должны быть максимально приближены друг к другу для минимизации неопределенности определения уровня стойкости. Коэффициент отношения уровней доз соседних точек k , позволяющий объединить границы интервалов, с учетом погрешности рассчитывается следующим образом:

$$k = D_{n+1} / D_n = D / (D - \delta D) .$$

С учетом погрешности дозиметрии дозовых испытаний ($\pm 10\%$) получим $k = 1,11$. С другой стороны, при определении уровня стойкости удобно брать коэффициент k таким, чтобы на десятикратное увеличение накопленной дозы приходилось фиксированное количество точек m , т.е. должно выполняться равенство $k^m = 10$, где m – минимальное целое число, такое, чтобы выполнялось неравенство $k \geq 1,11$. При $m = 20$ и $k = 1,122$ достигается максимальное соответствие заданным условиям. Возможна ситуация когда не выполняется выражение (1). Для учета этого случая шаги облучения предлагается выбирать по следующему алгоритму. Если выражение (1) выполняется для интервала ΔD_1 , то оно автоматически выполняется для всех последующих интервалов и $D_n = 1,122^n \cdot D_0$, если (1) не выполняется для ΔD_1 , то границы интервалов выбираются исходя из следующих соотношений:

$$D_n = n \cdot D_0, \quad \text{при } n \in [0; 10];$$

$$D_n = 1,122^{(n+10)} \cdot D_0, \quad \text{при } n \in [11; \infty].$$

Таким образом, при определенном уровне отказа $D_{\text{отк.}}$ уровень стойкости СБИС $D_{\text{ст.}}$ с учетом погрешности дозиметрии определяется соотношением:

$$D_{\text{ст.}} = D_{\text{отк.}} - (\Delta D_n + \Delta D_{n-1}) \quad (2)$$

Такой подход позволяет определить оптимальные интервалы облучения СБИС в условиях радиационного эксперимента, наиболее точно определить уровни и распределения параметров радиационной стойкости МП СБИС.

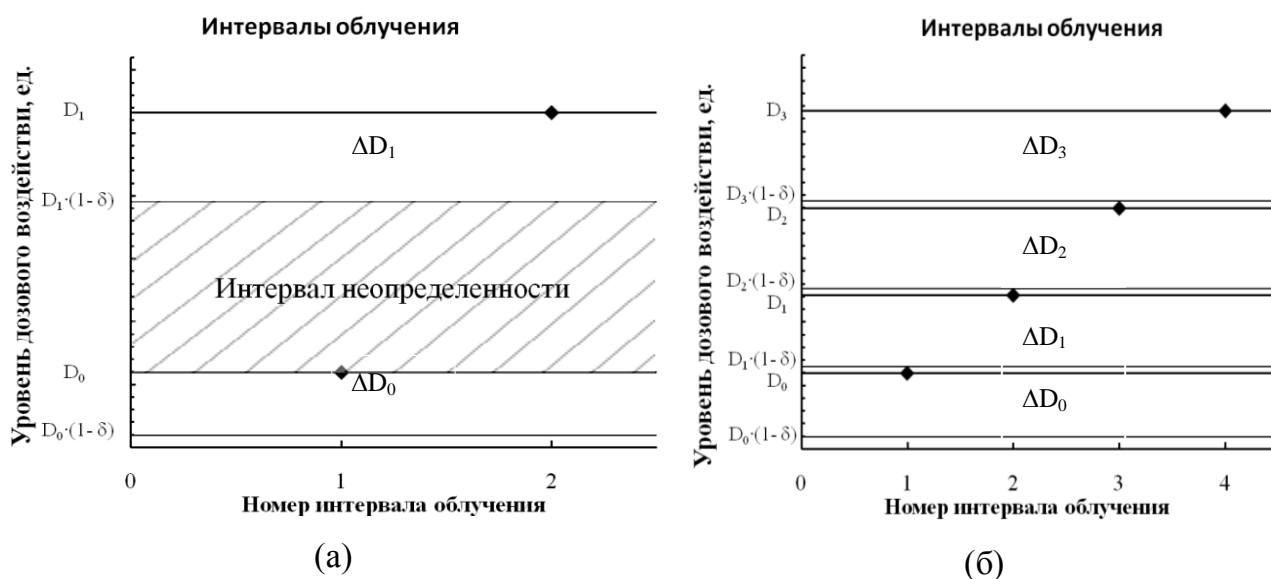


Рис. 3. Выбор интервалов облучения в процессе проведения радиационного эксперимента, (а) – облучение без минимизации интервала неопределенности, (б) – облучение с минимизацией интервала неопределенности.

Автором предложен метод учета взаимосвязи между уровнями функциональных отказов и моментами изменения градиента деградации параметров МП СБИС, как правило – токов потребления. В частности, во многих экспериментах обнаружено появление функциональных отказов МП при характерном изменении тока потребления и его градиента. На рисунке 4 изображена зависимость градиента изменения тока потребления от накопленной дозы для отечественного МК 1887BE1У, пунктиром обозначен уровень функционального отказа, который определялся искажением информации в ЭППЗУ программ.

Этот эффект можно использовать для оптимизации процесса проведения эксперимента и более точного определения уровня функционального отказа. Особенно эффективно метод работает в том случае, когда нет возможности использовать непрерывный контроль



Рис. 4. Зависимость градиента изменения тока потребления МК 1887BE1У от накопленной дозы.

функционирования МП СБИС в процессе облучения. Предложенная методика предполагает непрерывный контроль статического и динамического токов потребления СБИС. При обнаружении увеличения градиента изменения тока потребления, а также при смене знака градиента внутри интервалов облучения, эксперимент приостанавливается и проводится функциональный контроль. Данный метод позволяет повысить точность определения уровня функционального отказа на 10%.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Предложен метод выборочного ФК МП СБИС, который предполагает осуществление полного контроля наиболее важных и восприимчивых блоков МП СБИС на предельных частотах. На стадии предварительного анализа архитектурно-технологической организации СБИС проводится выбор узлов, потенциально наиболее чувствительных к заданным видам ИИ, и в ходе испытаний наиболее полно контролируется работоспособность именно этих узлов. В то же время остальные узлы МП СБИС контролируются в упрощенном режиме. Применение данного метода существенно снижает объем тестирования без потери достоверности результатов.

2. Разработана методика проведения ФК МП СБИС с использованием метода выборочного ФК. Предложены методы тестирования функциональных блоков МП СБИС при проведении радиационных исследований для разных видов ИИ. Разработана методика выбора интервалов облучения МП СБИС при дозовом воздействии, позволяющая минимизировать интервал неопределенности уровня стойкости СБИС до уровня погрешности дозиметрии.

Основной практический результат диссертации заключается в разработке методических и технических средств, обеспечивающих ФК МП СБИС при проведении радиационных исследований на моделирующих установках и имитаторах. Разработанные средства внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС».

Частные практические результаты работы и их реализация:

1) разработан и внедрен в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» аппаратно-программный комплекс ФК МП СБИС на основе аппаратуры National Instruments и программного обеспечения LabView;

2) получены оригинальные результаты экспериментальных исследований более 50 типов МП и МК.

3) предложена и апробирована методика функционального контроля МП СБИС, включающая ФК блоков МП и МК и выбор режима облучения в зависимости от времени функционального контроля и параметров радиационной установки.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- 1) Демидов А.А., Калашников О.А., Некрасов П.В. Функциональный контроль микропроцессоров при проведении радиационных испытаний // Приборы и техника эксперимента. 2009. – №2. – С.48-52.
- 2) Бобровский Д.В., Волин В.С., О.А.Калашников, Некрасов П.В., Рябцев Ю.С. Радиационная стойкость микропроцессоров семейства "МЦСТ-R" // Вопросы радиоэлектроники. 2010. – С.28-31.
- 3) Некрасов П.В., Яненко А.В. Усовершенствованный блок для исследования одиночных сбоев и защелкиваний в БИС ОЗУ // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов / Под редакцией В.Я.Стенина. – М.: МИФИ, 2003. –С.251-252.
- 4) Некрасов П.В., Демидов А.А., Калашников О.А. Универсальное устройство функционального контроля микросхем памяти // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов / Под редакцией В.Я.Стенина. – М.: МИФИ, 2004. – С.300-303
- 5) Некрасов П.В. Методы тестирования микропроцессоров на наличие одиночных сбоев и тиристорного эффекта от отдельных ядерных частиц // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов / Под редакцией В.Я.Стенина. –М.: МИФИ, 2005. – С.240-242.

- 6) Некрасов П.В. Функциональный контроль 32-х разрядного микропроцессора 1890ВМ1Т при проведении радиационных испытаний. Электроника, микро- и нано-электроника. Сб. научн. трудов / Под редакцией В.Я.Стенина. –М.:МИФИ, 2007. – С.276-279.
- 7) Калашников О.А., Некрасов П.В. Радиационные испытания микросхемы НРЕ3501Н // Научная сессия МИФИ-2004. Сб. научн. трудов. В 15 томах. Т.15. Конференция «Молодежь и наука». Автоматика и Электроника. Техническая физика и энергетика. М.МИФИ, 2004.– С. 65-66.
- 8) Демидов А.А., Калашников О.А., Некрасов П.В. Функциональный контроль микропроцессора с архитектурой PDP -11 при проведении радиационных испытаний // Научная сессия МИФИ-2005. Сб. научн. трудов. В 15 томах. Т.1. Автоматика. микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы. Т. 1. – М.:МИФИ, 2005. – С.204–205.
- 9) Некрасов П.В. Устройство для тестирования микропроцессора 1890ВМ1 при проведении радиационных исследований // Научная сессия МИФИ-2006. Сб. научн. трудов. В 15 томах. Т.1. Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы. – М.:МИФИ, 2006. – С.183–184.
- 10) Демидов А.А., Калашников О.А., Некрасов П.В. Особенности функционального контроля микропроцессоров при проведении радиационных исследований // Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научн. трудов. В 15 томах. Т.1. Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы. – М.: МИФИ, 2007. – С.168-169.
- 11) Епифанцев К.А., Калашников О.А., Лобанович Э.Ф., Лабкович А.К., Некрасов П.В. Исследования радиационной стойкости микроконтроллера 1880ВЕ51 / Научно-технический сборник. Радиационная стойкость электронных систем // Конференция «Стойкость-2002». Вып. 5. – М.: СПЭЛС, 2002. – С.43–44
- 12) Калашников О.А., Епифанцев К.А., Деревянкин В.М., Шорин А.М., Дубовик А.Я., Кузьмин А.Д., Миронов В.П., Некрасов П.В. Исследование радиационной стойкости модернизированных КМОП КНС ИС серии 1825. // Научно-технический сборник. Радиационная стойкость электронных систем // Конференция «Стойкость-2004». Вып. 7. – М.: СПЭЛС, 2004. – С.67-68.

- 13) Васильев А.Л., Калашников О.А., Круглов В.И. Некрасов П.В. Экспериментальные исследования радиационного поведения СБИС 1836ВМ3У, 1836ВМ4У, 1013ВЦ1Т // Научно-технический сборник. Радиационная стойкость электронных систем // Конференция «Стойкость-2005». Вып. 8. – М.: СПЭЛС, 2005. – С.75–76.
- 14) Демидов А.А., Калашников О.А., Некрасов П.В. Особенности функционального контроля микроконтроллеров и микропроцессоров при исследованиях одиночных сбоев. // Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научн. трудов. В 15 томах. Т.1. Автоматика. микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы. – М.: МИФИ, 2007. – С.168-169.
- 15) Некрасов П.В. Функциональный контроль СБИС микроконтроллера 1887ВЕ1У при радиационных испытаниях // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов / Под редакцией В.Я.Стенина. –М.:МИФИ, 2008.– С.67-68.
- 16) Калашников О.А., Некрасов П.В. Определение корреляции функционирования микропроцессоров с дозовым изменением их параметров // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов / Под редакцией В.Я.Стенина. –М.:МИФИ, 2009. – С.294-299.
- 17) Калашников О.А., Некрасов П.В. Радиационные эффекты в микропроцессорах семейства «МЦСТ-R» // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. научн. трудов / Под редакцией В.Я.Стенина. –М.:МИФИ, 2009. – С.266-271.
- 18) Некрасов П.В. Особенности функционального контроля микропроцессоров при радиационных испытаниях // Петербургский журнал электроники, Электронстандарт. –2009. –№1.– С.44-50.
- 19) Некрасов П.В., А.И. Яньков Исследования радиационного поведения микроконтроллера 1887ВЕ1У // Научно-технический сборник. Радиационная стойкость электронных систем // Конференция «Стойкость-2008». Вып. 11. – М.: СПЭЛС, 2008.– С.53-54.
- 20) Некрасов П.В. Выбор интервалов облучения интегральных схем при дозовом воздействии // Научно-технический сборник. Радиационная стойкость электронных систем // Конференция «Стойкость-2009». Вып. 12. – М.: СПЭЛС, 2009.– С.229-231.
- 21) А.А.Демидов, А.В.Согоян, Некрасов П.В. Исследование соответствия радиационного поведения параметров КМОП СБИС в процессе облучения и отжига // Научно-технический сборник. Радиационная стойкость электронных систем // Конференция «Стойкость-2009». Вып. 12. – М.: СПЭЛС, 2009.– С.33-34.