

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77

**ПИСКУН**

**Геннадий Адамович**

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2015

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель

**Алексеев Виктор Федорович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

**Лыньков Леонид Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Ефименко Сергей Афанасьевич**, кандидат технических наук, главный конструктор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Оппонирующая организация

Открытое акционерное общество «КБТЭМ-ОМО»

Защита состоится «26» марта 2015 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «    » февраля 2015 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
д-р техн. наук, профессор

С.В. Бордусов

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Промышленностью Республики Беларусь выпускаются различные технические средства, использующие в своем составе современные изделия микроэлектроники – микроконтроллеры, выполняющие функцию управления электронными устройствами. Их обширная номенклатура, обусловленная разнообразными функциональными возможностями, создает разработчикам изделий достаточно хорошие условия для проектирования сложной конкурентоспособной аппаратуры различного назначения. Вместе с тем достаточно сложно осуществить эффективную защиту микроконтроллеров от внешних воздействий, особенно от такого деструктивного влияния, как электростатический разряд.

Учитывая специфику работы микроконтроллеров, основанную на выполнении запрограммированных функций, особое внимание целесообразно уделять безопасности информационного ресурса, а также защите сведений от их случайного или умышленного повреждения. При этом проблема защиты информации является многоплановой комплексной задачей, предполагающей рассмотрение вопросов обеспечения целостности записанного во встроенную флеш-память программного кода (защита от сбоев, ведущих к потере информации, а также защита от уничтожения данных).

На настоящий момент существует достаточно большое число работ в области определения влияния разрядов статического электричества на функционально сложные изделия твердотельной электроники. Наиболее значимые результаты были получены российскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования в таких областях, как воздействие разрядов статического электричества на полупроводниковые изделия (М.И. Горлов, В.А. Емельянов, Л.П. Ануфриев); методы защиты устройств от электромагнитных помех (Л.Н. Кечиев); средства защиты интегральных схем от воздействия деструктивных импульсов разрядного тока (В.А. Каверзнев, Г.Д. Грошева). Среди зарубежных авторов особый интерес вызывают работы Ч. Джоввета, Э. Хабигера, А. Шваба, А. Amerasekera, О. Semenov и Steven H.Voldman, в которых представлено описание некоторых механизмов влияния и упрощенные аналитические подходы для решения задач, связанных с воздействием разрядов статического электричества на приборы.

Однако проблема контроля функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров с записанным во встроенную флеш-память программным кодом после воздействия разрядов статического электричества разработана не в полной мере. В частности, научный и практический интерес представляет разработка методик функциональной и эксплуатационной диагностики микроконтроллеров с проверкой целостности записанного массива данных и определением областей их неустойчивого функционирования вследствие появившихся изменений в коде и др.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертации утверждена на заседании Совета учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 9 от 14 декабря 2009 г.) и соответствует подразделу 12.1 «Физические и математические методы и их применение для решения актуальных проблем естествознания, техники, новых технологий, экономики и социальных наук» Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19 апреля 2010 г., № 585.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем БГУИР и соответствует научному направлению университета «Сертификация, диагностика и испытания элементов, устройств и систем», утвержденному приказами ректора университета от 26.01.2011 № 52-н и от 01.11.2011 № 876-н.

Часть результатов диссертации получена в рамках проведения научных исследований по ГБ № 12-2021 «Разработка феноменологических моделей и научно-методических основ компьютерного проектирования радиоэлектронных средств, технического обеспечения безопасности и создания электронных систем безопасности» (2012–2016 гг., № ГР 20123088) и в соответствии с грантом Министерства образования Республики Беларусь на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами, студентами по теме «Моделирование воздействия электростатического разряда на полупроводниковые приборы радиоэлектронных средств» (2011–2012 гг., № ГР 20121726).

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является анализ функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров с записанным во встроенную флеш-память программным кодом и моделирование тепловых процессов в геометрически сложной системе взаимосвязанных токоведущих элементов интегральных микросхем после воздействия электростатических разрядов.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Систематизация и анализ текущего состояния проблемы и возможность разработки новых алгоритмов технической диагностики микроконтроллеров с записанным во встроенную флеш-память программным кодом.

2. Анализ протекающих тепловых процессов в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате контактного воздействия электростатического разряда на наружный вывод, которые позволят выявить изменение температуры, напряженности электрического поля и мощности электромагнитных потерь в каждом элементе и в областях их контакта в зависимости от напряжения разряда.

3. Проведение исследований по разработанной методике анализа работоспособности микроконтроллеров после воздействия электростатических разрядов, при котором происходит изменение запрограммированных данных.

4. Разработка способа функционального контроля микроконтроллеров после воздействия разрядов статического электричества, позволяющего улучшить результат разбраковки за счет получения сведений о возможных нарушениях во встроенной флеш-памяти микросхем.

### **Научная новизна**

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

- экспериментально установлена линейная зависимость изменения температуры в геометрически сложной системе взаимосвязанных токоведущих элементов интегральных микросхем от напряжения разряда статического электричества;
- разработан алгоритм определения значения напряжения разряда статического электричества, при котором происходит изменение запрограммированных функций микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью;
- предложена численная модель расчета интенсивности отказов микроконтроллеров с использованием поправочного коэффициента, учитывающего напряжение и тип воздействия разряда статического электричества.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Модель переноса тепловой энергии в токоведущих элементах интегральных микросхем при воздействии разряда статического электричества, основанная на численном решении уравнения электропроводности и Фурье-анализе теплопроводности, отличающаяся от известных использованием последовательно составленных плоских и цилиндрического тел с различными тепловыми сопротивлениями, позволяющая определять изменения температуры (в диапазоне 300 – 430 К при напряжении разряда от 2 до 8 кВ) и выявлять наиболее уязвимые к перегреву элементы (внешний вывод микросхемы в области максимального изгиба).

2. Методика анализа работоспособности микроконтроллеров, основанная на контроле состояния записанного кода при ступенчатом повышении напряжения воздействующего электростатического разряда (шаг 0,1 кВ), обеспечивающая определение порогового значения напряжения разряда (свыше 75 % от его предельного), приводящего к изменению кода, позволяющая производить отбраковку потенциально ненадежных микросхем.

3. Способ функционального контроля микроконтроллеров, основанный на воздействии разрядов статического электричества, подтверждающий увеличение времени записи программного кода до 16 раз (при напряжении разряда до 8 кВ), позволяющий определять возможные нарушения во встроенной флеш-памяти микросхем.

4. Численная модель расчета интенсивности отказов микроконтроллеров, включающая поправочный коэффициент, учитывающий тип воздействия (контактный или воздушный) и напряжение разряда статического электричества (для контактного разряда поправочный коэффициент равен 1; для воздушного разряда равен 0,75 при напряжении разряда 8 кВ и 0,5 при напряжении 15 кВ), позволяющая повысить точность вычислений до 50 % по сравнению с известными моделями оценки надежности.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

В диссертационной работе представлены материалы исследований, которые являются результатом самостоятельной работы автора. Соискателем выполнены исследования по определению влияния электростатических разрядов на микроконтроллеры, обобщены сведения по значениям напряжения разряда, при котором происходят изменения в записанном программном коде, а также проведен анализ полученных результатов.

Планирование работ, определение структуры, целей и задач исследования, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводились совместно с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом В.Ф. Алексеевым.

В совместных работах с соавторами соискатель принимал непосредственное участие на всех этапах проведения исследований по определению зависимости изменения температуры в системе токоведущих элементов микроконтроллеров от напряжения электростатического разряда, а также в обсуждении полученных результатов и подготовке материалов к опубликованию.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих республиканских и международных конференциях и семинарах: 14-й, 15-й Международные молодежные форумы «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков, Украина, 2010–2011 гг.; 7, 8 9 и 10-я Международные молодежные научно-технические конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций», Севастополь, Украина, 2011–2014 гг.; 3, 4 и 5-я Международные студенческие научно-технические конференции «Новые направления развития приборостроения», Минск, Беларусь, 2010–2012 гг.; Международный форум студенческой и учащейся молодежи «Первый шаг в науку – 2010», Минск, Беларусь, 2010 г.; XIII Республиканская научная конференция студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях», Гомель, Беларусь, 2010 г.; 47, 48, 49 и 50-я научно-технические конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 2011–2014 гг.

Результаты диссертационной работы внедрены на ведущих производственных предприятиях Республики Беларусь – ОАО «КБТЭМ-ОМО» и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

### **Опубликование результатов диссертации**

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 16 печатных работах. В их числе 8 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, 2 статьи в сборниках материалов научных конференций, 2 депонированные рукописи, 2 тезисов докладов на научных конференциях и 1 патент Республики Беларусь. Получено положительное решение на выдачу патента на изобретение Республики Беларусь.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3,5 авторских листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и семи приложений.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана ее научная и практическая значимость, В **первой главе** проведен обзор современных методов испытаний микроконтроллеров на устойчивость к воздействию электростатических разрядов, анализируются типовые механизмы их повреждений. Рассмотрены особенности структуры и архитектура наиболее широко используемых микроконтроллеров, принцип работы встроенной флеш-памяти, особенности формирования данных и виды доступа к ним. Во **второй главе** представлено исследование тепловых процессов в интегральных микросхемах при воздействии разрядов статического электричества. Разработана модель интегральной микросхемы с учетом материалов, граничных условий, геометрических форм и размеров областей. Приведены результаты моделирования тепловых процессов в геометрически сложной системе, состоящей из взаимодействующих сегментов с различной электро- и теплопроводностью, а также представлена обработка полученных данных. В **третьей главе** исследованы функциональные и эксплуатационные характеристики микроконтроллеров после воздействия электростатических разрядов. Разработана методика определения значения напряжения разряда статического электричества, при котором происходит изменение в записанном коде по сравнению с эталонным значением массива данных, а также способ функционального контроля, основанный на экспериментальном установлении времени записи кода и расчете интен-

сивности отказов. В **четвертой главе** приведены результаты исследований по разработанным методикам, подтверждающие их достоверность при осуществлении технической диагностики микроконтроллеров. В **приложениях** приведены краткие сведения, необходимые для пояснения изложенного материала, а также акты внедрения результатов диссертации.

Общий объем диссертационной работы составляет 203 страницы. Из них 87 страниц основного текста, 63 иллюстрации на 27 страницах, 26 таблиц на 9 страницах, библиографический список из 169 наименований на 12 страницах, список собственных публикаций соискателя из 16 наименований на 2 страницах и 7 приложений на 66 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы технической диагностики микроконтроллеров, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованности, а также ее структура и объем.

В **первой главе** представлен анализ современных подходов к проведению испытаний микроконтроллеров на устойчивость к воздействию электростатических разрядов. Из анализа следует, что проблема реализации технической диагностики полупроводниковых приборов и интегральных микросхем заключается в отсутствии точных алгоритмов и методик контроля повреждений программного кода, записанного во встроенную флеш-память. Ее решение позволит оптимизировать процесс отбраковки микроконтроллеров, которые на настоящий момент являются связующим звеном в устройствах специального и бытового назначения, а также сократить материальные затраты на их дефектацию, что обуславливает актуальность проводимых исследований.

В работе показано, что диагностику микроконтроллеров целесообразно осуществлять с учетом особенностей внутренней структуры и вариантов архитектуры, а также приводятся основные принципы реализации памяти и организация выборки команд данных.

В представленном обзоре литературы особое внимание уделено принципу организации процессов чтения, стирания и записи информации во встроенную флеш-память микроконтроллера, которые базируются на процессе туннелирования электронов.

При извлечении данных из памяти заряд на «плавающем» затворе отсутст-



вует, а на управляющий затвор подается заряд положительного направления. Под его воздействием между стоком и истоком создается свободная зона, что позволяет данным памяти считываться с истока. Высокое положительное напряжение на истоке приводит к стиранию информации из флеш-памяти. Запись массива данных во флеш-память микроконтроллеров осуществляется за счет переноса заряда в область «плавающего» затвора через слой диэлектрика.

Несоответствие подаваемых напряжений на области истока и затвора (стирание кода) и на области затвора и стока (запись кода) вследствие внешнего воздействия разрядов статического электричества может привести к некорректному срабатыванию вышеуказанных областей.

Проанализированы особенности испытаний микроконтроллеров на устойчивость к разрядам тока. Выявлено, что они проводятся преимущественно по трем основополагающим моделям: модель тела человека, машинная модель и модель заряженного прибора. Основным отличием данных моделей является варьирование параметров разряда по длительности и форме импульса, однако закономерности их развития практически идентичны.

При проведении анализа механизмов повреждений в результате воздействия разрядов статического электричества выявлено, что в большинстве случаев они могут быть обусловлены не только физико-химическими изменениями в полупроводниковом кристалле микроконтроллера, но и в таких токоведущих элементах, как наружный вывод, внутренний вывод, контактная площадка и металлизированные дорожки.

**Вторая глава** посвящена исследованию переноса тепловой энергии в интегральных микросхемах при воздействии разрядов статического электричества. Основываясь на возможностях программного комплекса COMSOL Multiphysics, разработана модель микросхемы, состоящая из пяти основных (без учета узлов пайки) токоведущих областей, в каждой из которых решались уравнения электро- и теплопроводности с учетом граничных условий.

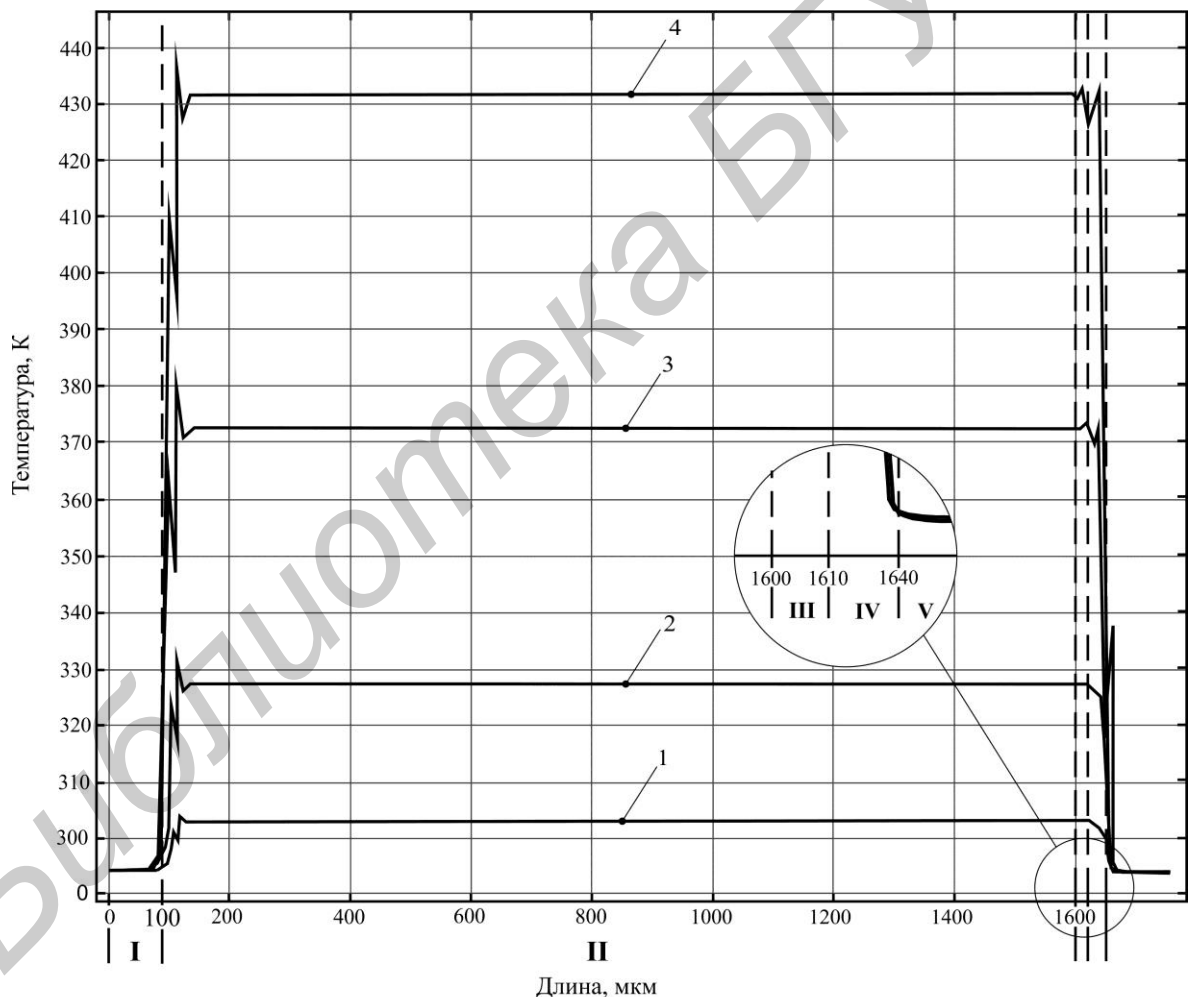
В разработанной модели использованы следующие обозначения областей, которые задавались свойствами определенных наиболее часто используемых материалов в полупроводниковой промышленности (рисунок 1):

- «наружный вывод», на который осуществляется воздействие контактного электростатического разряда, представлен участком из материала «Медь»;
- «внутренний вывод», связывающий наружный вывод микроконтроллера с контактной площадкой, представлен участком «Золото»;
- «контактная площадка», соединяющая внутренний вывод с областью «металлизированная дорожка», представлена участком «Золото»;
- «металлизированная дорожка» на полупроводниковом кристалле интегральной микросхемы представлена участком «Алюминий»;
- «полупроводниковый кристалл» представлен участком «Кремний».



**Рисунок 1. – Расчетная область с обозначением границ**

В результате проведенного эксперимента по контактному воздействию разряда статического электричества на наружный вывод интегральной микросхемы напряжениями 2, 4, 6 и 8 кВ выявлено изменение температуры токоведущих элементов в диапазоне 300 – 430 К (рисунок 2).

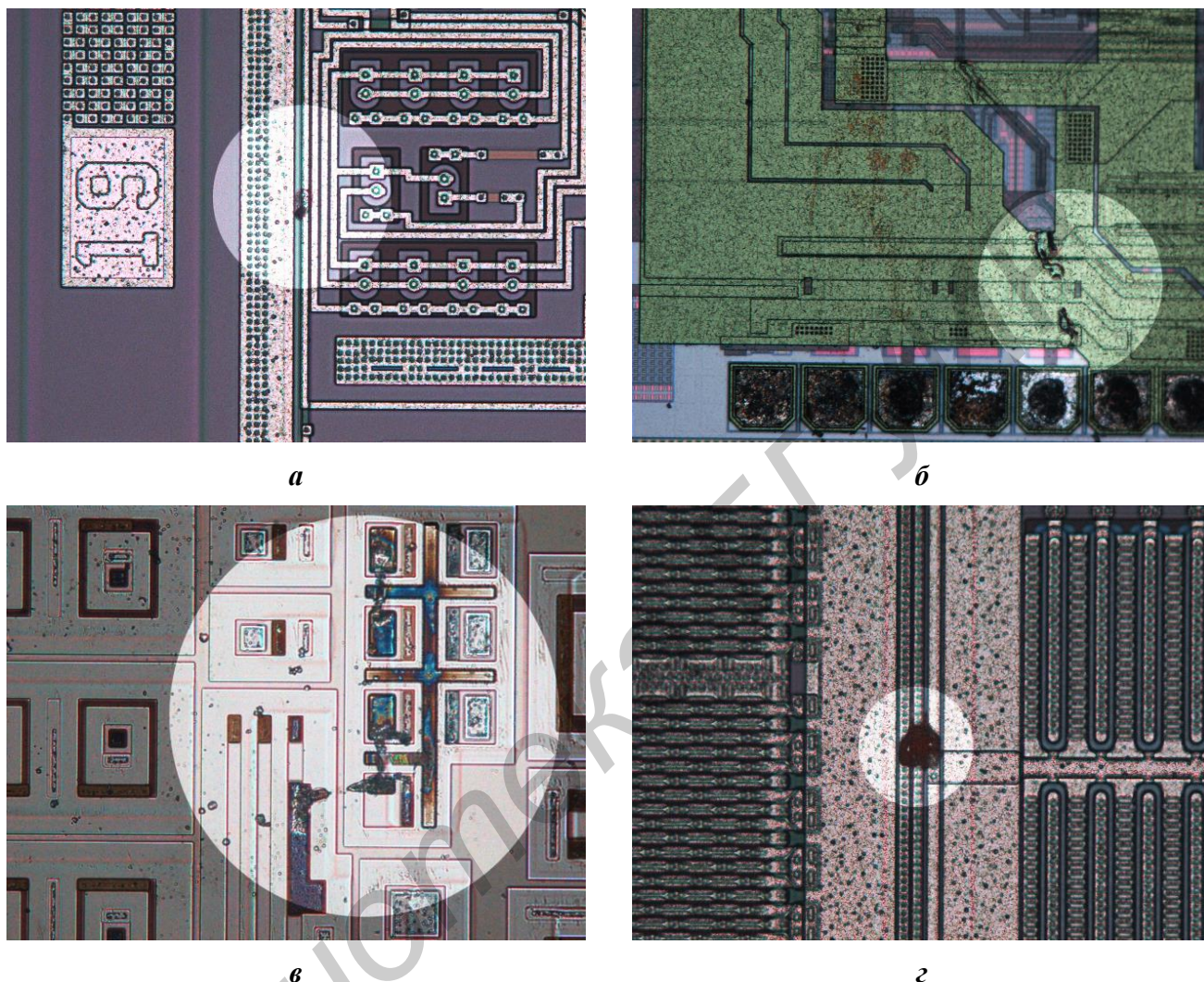


I - область «наружный вывод»; II - область «внутренний вывод»; III - область «контактная площадка»; IV - область «металлизированная дорожка»; V - область «полупроводниковый кристалл»

**1 – 2 кВ; 2 – 4 кВ; 3 – 6 кВ; 4 – 8 кВ**

**Рисунок 2. – Изменение температуры в системе токоведущих элементов интегральных микросхем при различных напряжениях разряда статического электричества**

На рисунке 3 представлены фотографии повреждений интегральных микросхем, выявленных с помощью программно-аппаратного комплекса для получения цифровых изображений при различных напряжениях действующего разряда.



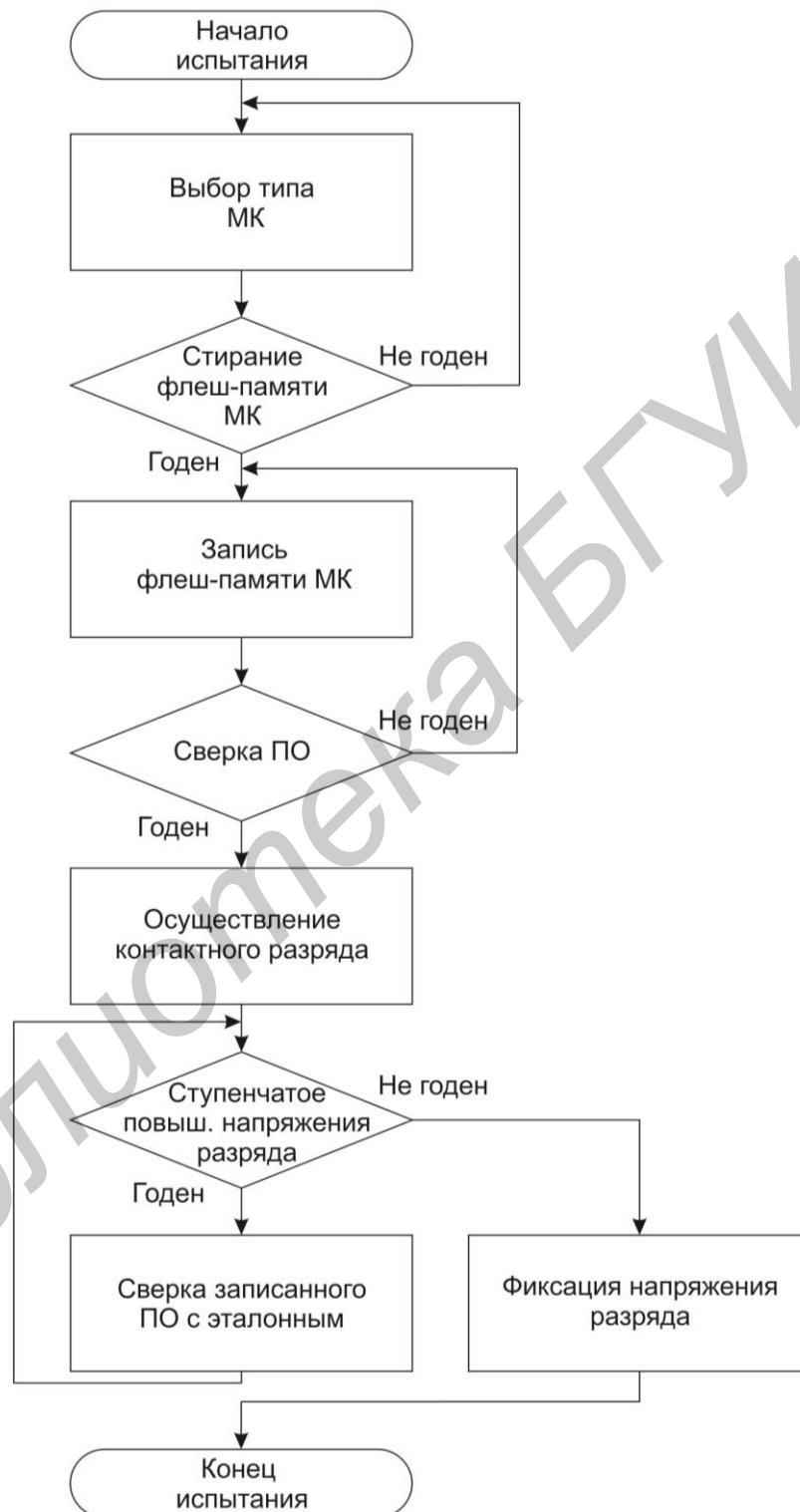
*a* – 2 кВ; *б* – 4 кВ; *в* – 6 кВ; *г* – 8 кВ

**Рисунок 3. – Повреждения, зарегистрированные с помощью программно-аппаратного комплекса для получения цифровых изображений**

На основании проведенных исследований тепловых процессов в интегральных микросхемах при воздействии разрядов статического электричества, основанных на возможностях программного комплекса COMSOL Multiphysics, установлена линейная зависимость изменения температуры в каждой области неоднородного тела, образованного системой плоских и цилиндрических объектов с различными тепловыми сопротивлениями, от напряжения наносекундного электромагнитного импульса.

В **третьей главе** исследованы функциональные и эксплуатационные характеристики микроконтроллеров после воздействия разрядов статического электричества.

Предложена методика определения напряжения разряда, при котором начинает происходить изменение в записанном программном коде, построенная на алгоритме сверки данных кода с его эталонным значением (рисунок 4).



**Рисунок 4. –Алгоритм определения значения напряжения, при котором происходит некорректное срабатывание запрограммированных функций микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью, после контактного воздействия разряда статического электричества**

В результате проведения экспериментов по предложенной методике было установлено, что предельное значение воздействующего разряда статического электричества не является существенным показателем для микроконтроллеров по сравнению со значением напряжения импульса, при котором происходит изменение записанного программного кода.

Некорректное выполнение запрограммированных функций, выявленное в процессе работы микроконтроллера и обусловленное влиянием электростатических разрядов, целесообразно диагностировать с помощью разработанных специализированных тестовых программ (ТП). Такие программные средства ориентированы под конкретную структуру микроконтроллера и позволяют выявить дефекты на уровне функционального блока (ФБ). Результаты выполнения тестирования представляются таблицей состояния функциональных блоков (таблица 1), в которую вносятся значения корректного «1» или некорректного «0» выполнения тестовых программ.

Таблица 1. – Пример таблицы состояния функциональных блоков микроконтроллера после контактного воздействия разряда статического электричества

Тестовая программа	Функциональный блок								
	ФБ1	ФБ2	ФБ3	ФБ4	ФБ5	ФБ6	ФБ7	...	ФБ $n$
ТП1	1	0	0	1	1	1	0	...	0
ТП2	1	0	1	0	1	0	1	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ТП $n$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Результат теста	1	0	0	0	1	0	0	...	0

Исходя из специфики проведения испытаний микроконтроллеров с записанным во встроенную флеш-память программным кодом на устойчивость к контактному воздействию разряда статического электричества, предложен способ функционального контроля, который состоит из трех этапов: «подготовительный», «экспериментальный» и «аналитический».

Целью «подготовительного» этапа является выявление потенциально ненадежных изделий. Это осуществляется за счет определения критериев отбраковки, проведения отбраковочных испытаний, а также анализа встроенной флеш-памяти с учетом специфики процессов стирания, записи и инициализации программного кода.

На «экспериментальном» этапе определяются значения напряжения, при которых происходит изменение в записанном во встроенную флеш-память программном коде по сравнению с эталонным массивом данных.

На «аналитическом» этапе проводится анализ достоверности полученных результатов и формирование групп микроконтроллеров по надежности. Также осуществляется оценка их работоспособного состояния, построенная на расчете интенсивности отказов ( $\lambda_{ЭСР}$ ) с использованием предложенного автором поправочного коэффициента ( $K_{ЭСР}$ )

$$\lambda_{ЭСР} = \frac{-\ln [1 - 0,00057 \exp (-0,0002 K_{ЭСР} U_{ЭСР})]}{0,00876} \times 10^{-6},$$

где  $U_{ЭСР}$  – напряжение разряда статического электричества, В;

$K_{ЭСР}$  – поправочный коэффициент, учитывающий тип воздействия разряда (контактный или воздушный).

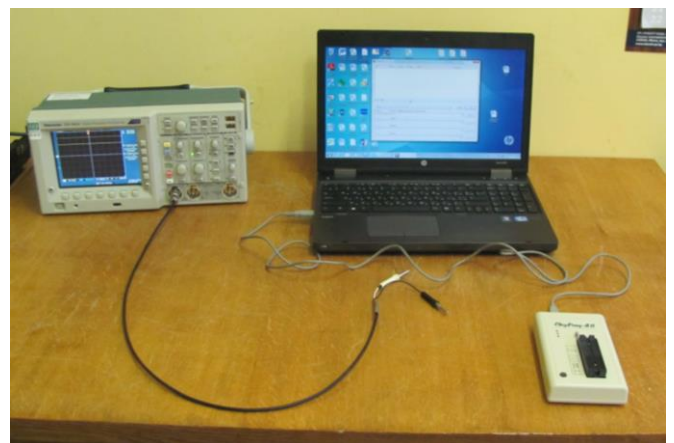
Основываясь на специфике проведения испытаний микроконтроллеров на устойчивость к воздействию электростатических разрядов, а также на особенностях воздействия (контактный или воздушный), рассчитаны следующие поправочные коэффициенты: для контактного разряда  $K_{ЭСР} = 1$ ; для воздушного разряда  $K_{ЭСР} = 0,75$  при  $U_{ЭСР} = 8$  кВ и  $K_{ЭСР} = 0,5$  при  $U_{ЭСР} = 15$  кВ.

В четвертой главе представлены результаты исследований 8-разрядных микроконтроллеров на примере Attiny 2313/V (изготовитель Atmel); IN89C2051DW (изготовитель ОАО «ИНТЕГРАЛ») и AT89C51RC (изготовитель Atmel) с записанным во встроенную флеш-память программным кодом после воздействия разрядов статического электричества, полученные с учетом разработанных автором методик.

Для чистоты эксперимента и обеспечения достоверности полученных результатов испытания проводились на специализированном оборудовании в лабораторных условиях (рисунок 5).



а



б

**Рисунок 5. – Внешний вид установки для проведения испытаний микроконтроллеров на устойчивость к контактному воздействию разрядов статического электричества (а) и внешний вид установки для их функционального тестирования (б)**

При воздействии разрядами статического электричества на микроконтроллеры начальное (250 В) и последующие (500 В, 1 кВ, 2 кВ и 4 кВ) напряжения импульсов тока соответствовали величинам, приведенным в действующих на территории Республики Беларусь стандартах. Для наиболее точного определения значения напряжения, при котором происходит изменение записанного во встроенную флеш-память массива данных, его повышение осуществлялось с ближайшего наименьшего вышеуказанного значения с шагом 100 В.

На основании проведенных экспериментов были получены следующие результаты технической диагностики для микроконтроллеров типа Attiny 2313/V.

При стандартных напряжениях разряда, а также из диапазона от 4,1 по 4,9 кВ не было выявлено никаких изменений ни в одном из функциональных блоков. Составленная таблица состояний соответствовала данным из таблицы с эталонными значениями.

Следующее напряжение воздействующего импульса соответствовало значениям от 5,0 по 5,2 кВ. При данных напряжениях разряда не было выявлено никаких изменений в выполнении запрограммированных функций и значение контрольных сумм кода осталось без изменений. Однако при осуществлении процесса стирания и инсталляции было установлено, что контрольная сумма записанного во флеш-память кода не соответствует эталонному значению, что свидетельствует о возникновении повреждений. На основании этого можно сделать вывод о том, что начальным значением напряжения, при котором начинаются изменения в записанном массиве данных, является 5,0 кВ.

После воздействия электростатического разряда напряжением от 5,2 по 5,4 кВ на наружные выводы микроконтроллера было выдано программное сообщение «*неверный идентификатор микросхемы*». Это привело к некорректному сравнению, чтению, стиранию и контролю записываемого массива данных. Учитывая то, что из памяти микроконтроллеров невозможно было обеспечить считывание какой-либо информации, то снять контрольные суммы кода и сверить их значения с эталонными не представлялось возможным.

В результате функционального контроля диагностируемых микроконтроллеров после воздействия разрядами напряжением 5,4 кВ и выше составить матрицу результатов не представлялось возможным, что обусловлено полной утратой их работоспособности.

Для микроконтроллеров типа Attiny 2313/V, в которых были выявлены нарушения в записанном массиве данных, можно выделить три диапазона напряжений: от 5,0 кВ и выше – область функционального нарушения; от 5,2 кВ и выше – область программного нарушения; от 5,4 кВ и выше – область полной утраты работоспособности.

При диагностике микроконтроллеров типа IN89C2051DW производились разряды со стандартными напряжениями, а также из диапазона от 1,1 до 1,4 кВ.

При составлении таблицы состояний не было выявлено никаких изменений ни в одном из функциональных блоков.

При воздействии разряда статического электричества напряжениями от 1,4 до 1,8 кВ в работе микроконтроллеров данного типа не было выявлено никаких сбоев. Однако при осуществлении процесса формирования контрольных сумм кода с использованием двух специализированных хеш-функций были получены значения, не соответствующие эталонным. Это указывает на то, что исходный записанный код претерпел изменения. Таким образом, начальным значением напряжения, при котором происходит изменение в записанном программном коде, является 1,4 кВ.

В результате воздействия разрядами напряжением из диапазона от 1,8 кВ и выше составить таблицу состояния было невозможно, что обусловлено полной утратой работоспособности и отсутствием возможности определения каких-либо параметров с использованием специализированного программатора.

После технической диагностики микроконтроллеров типа IN89C2051DW были выявлены нарушения в массиве данных, вызванные разрядами с напряжением из двух диапазонов: от 1,4 до 1,8 кВ – область программного нарушения и от 1,8 кВ и выше – область полной утраты работоспособности.

В результате проведения экспериментов с микроконтроллерами типа AT89C51RC были осуществлены воздействия статического электричества по методу контактного разряда со стандартными напряжениями, а также из диапазона от 4,1 до 5,9 кВ. Анализ состояния функциональных блоков микросхемы показал, что в коде никаких изменений не установлено.

При воздействии импульсами напряжением от 6,0 до 6,2 кВ, при осуществлении перезаписи массива данных было получено следующее программное сообщение *«ошибка сравнения при  $U_{CC}=5,00V$  по адресу 00000000 вместо 02 записано 52»*, подтверждающее появление дефекта, который может привести к некорректному срабатыванию. Время записи данных увеличилось с 1 мин 50 с до 30 мин 57 с.

Действие разряда напряжением от 6,2 по 6,4 кВ привело к существенным изменениям данных, так как было повреждено 94 % информации, записанной во встроенную флеш-память микроконтроллера. Выявленное ухудшение было обнаружено при осуществлении сверки записанного массива данных с эталонным.

На этапе функционального контроля исследуемых микроконтроллеров в случае воздействия импульсами напряжением от 6,4 кВ и выше составить матрицу результатов не представлялось возможным из-за полной утраты работоспособности и отсутствия возможности определения каких-либо параметров.

В микроконтроллерах типа AT89C51RC были выявлены нарушения в записанном во встроенную флеш-память массиве данных при разрядах из трех диапазонов напряжений: от 6,0 кВ и выше – область функционального нарушения; от



6,2 кВ и выше – область программного нарушения; от 6,4 кВ и выше – область полной утраты работоспособности.

В приложениях приведены сведения, необходимые для пояснения изложенного материала, а также акты внедрения результатов диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Выполнен анализ существующих методик контроля функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров на устойчивость к воздействию разрядов статического электричества. Показано, что выявление изменений электрических (статических и динамических) параметров для микроконтроллеров не является наиболее значимым показателем, так как велика вероятность повреждения программного кода, записанного во встроенную флеш-память. Обоснована необходимость разработки новых подходов к технической диагностике микроконтроллеров с записанным во встроенную флеш-память массивом данных [1, 2, 6, 11, 12].

2. Установлена линейная зависимость изменения температуры в системе токоведущих элементов («наружный вывод – внутренний вывод – контактная площадка – металлизированные дорожки – полупроводниковый кристалл») интегральных микросхем от напряжения разряда статического электричества. Экспериментально выявлено, что в результате контактного воздействия электростатического разряда на наружный вывод изменение температуры в системе токоведущих элементов составляет от 300 К (при напряжении разряда 2 кВ) до 430 К (при напряжении разряда 8 кВ). Определена разность температур на участках контакта «наружный вывод – внутренний вывод» и «внутренний вывод – контактная площадка», которая находится в диапазоне от 10 К (при напряжении разряда 2 кВ) до 140 К (при напряжении разряда 8 кВ) [5, 8, 9, 10, 13, 14].

3. Экспериментально установлены значения напряжения, при которых происходят повреждения кода после воздействия разрядов статического электричества. Для микроконтроллеров типа Attiny 2313/V оно составляет свыше 90 %, для IN89C2051DW – свыше 75 % и для AT89C51RC – свыше 95 % от предельного значения напряжения разряда. Определены значения напряжений, при которых происходят функциональные (Attiny 2313/V – от 5,0 кВ и AT89C51RC – от 6,0 кВ) и программные (Attiny 2313/V – от 5,2 кВ; IN89C2051DW – от 1,4 кВ и AT89C51RC – от 6,2 кВ) нарушения в работе микроконтроллеров [3, 4].

4. С помощью разработанного способа функционального контроля 8-битных микроконтроллеров с записанным во встроенную флеш-память программным кодом после воздействия разрядов статического электричества выявлено увеличение времени записи массива данных. Экспериментально установлено, что при напря-

жении разряда от 2 до 8 кВ, время записи кода увеличивается от 2 до 16 раз. Определено, что изменение скорости инсталляции кода связано с нарушением целостности ячеек флеш-памяти [1, 2, 3, 4, 15].

5. Установлено, что расчет интенсивности отказов микроконтроллеров в результате воздействия разряда статического электричества целесообразно осуществлять с учетом типа разряда (контактный или воздушный). Показано, что повышение точности вычислений возможно благодаря введению поправочного коэффициента ( $K_{ЭСР}$ ), учитывающего метод воздействия разряда, напряжение и ток разряда, а также относительную влажность среды. В результате проведенных расчетов получены следующие значения поправочных коэффициентов: для контактного разряда различного напряжения –  $K_{ЭСР} = 1$ ; для воздушного разряда при  $U_{ЭСР} = 2$  кВ и  $U_{ЭСР} = 4$  кВ –  $K_{ЭСР} = 1$ ; при  $U_{ЭСР} = 8$  кВ –  $K_{ЭСР} = 0,75$  и  $U_{ЭСР} = 15$  кВ –  $K_{ЭСР} = 0,5$ . Введение предложенного коэффициента позволяет повысить точность вычисления интенсивности отказов микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью до 50 % по сравнению с известными моделями оценки надежности [7, 16].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Предложено использовать полученные линейные зависимости изменения температуры в системе токоведущих элементов микроконтроллеров для наиболее адекватного описания тепловой нестационарности с учетом физико-химических свойств каждого элемента в результате воздействия электростатических разрядов. Это позволит оптимизировать технологические процессы при производстве, а также при разработке и внедрению перспективных материалов для данных элементов [8, 9, 10].

2. Применение разработанных методик технической диагностики функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью после воздействия разряда статического электричества возможно в полупроводниковой промышленности при реализации работ по проектированию и разработке современных микросхем (организация защитных структур, оптимизация топологических размеров, разбраковки потенциально ненадежных компонентов и т. д.) [15, 16].

3. Проведенная серия экспериментов над микроконтроллерами с записанным во встроенную флеш-память программным кодом на устойчивость к воздействию электростатических разрядов подтверждает достоверность разработанных методик. Полученные результаты внедрены на таких производственных предприятиях Республики Беларусь, как ОАО «КБТЭМ-ОМО» и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Методика испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам / В.Ф. Алексеев, Н.И. Силков, Г.А. Пискун, А.Н. Пикулик // Доклады БГУИР. – 2011. – № 5 (59). – С. 5–12.

2. Алексеев, В.Ф. Методика оценки устойчивости микроконтроллеров к воздействию разрядов статического электричества при ступенчатом повышении напряжения / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2012. – № 2 (40). – С. 34–40.

3. Пискун, Г.А. Контроль функционирования микроконтроллеров при воздействии электростатического разряда / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // Доклады БГУИР. – 2012. – № 6 (68). – С. 12–18.

4. Алексеев, В.Ф. Влияние разрядов статического электричества на программное обеспечение, инсталлированное во встроенную flash-память микроконтроллеров / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // Радиоэлектроника и информатика. – 2012. – № 3 (58). – С. 8–12.

5. Брылева, О.А. Основные механизмы повреждения микроконтроллеров вследствие влияния электростатических разрядов / О.А. Брылева, В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 2 (39). – С. 130–137.

6. Пискун, Г.А. Методы технической диагностики микроконтроллеров при воздействии электростатических разрядов / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, О.А. Брылева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 2 (39). – С. 156–163.

7. Пискун, Г.А. Планирование эксперимента по выявлению изменений в программном обеспечении микроконтроллеров с flash-памятью при воздействии электростатического разряда / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки. – 2013. – № 6 (81). – С. 139–146.

8. Моделирование распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате воздействия электростатических разрядов / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, В.Л. Ланин, В.Г. Левин // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4 (82). – С. 16–22.

### Статьи в сборниках материалов научных конференций

9. Пискун, Г.А. Компьютерное моделирование процесса развития электростатического разряда в COMSOL Multiphysics / Г.А. Пискун, О.А. Кистень // Новые направления развития приборостроения: материалы 4-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, Респ. Беларусь, 16–18 ноября 2011 г. / БНТУ. – Минск, 2011. – С. 378–379.

10. Пискун, Г.А. Математическое описание развития электростатического разряда в газовой среде в программном пакете COMSOL Multiphysics / Г.А. Пискун, О.А. Кистень // Новые направления развития приборостроения: материалы 4-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, Респ. Беларусь, 16–18 ноября 2011 г. / БНТУ. – Минск, 2011. – С. 380–381.

#### **Депонированные рукописи**

11. Чувствительность универсального цифрового мультимедийного интерфейса к воздействию электростатических разрядов / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун, И.М. Рудкевич, О.И. Колесников; Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2013. – 9 с. – Деп. в ГУ «БелИСА» 26.02.2014, № Д20144.

12. Влияние электростатического разряда на устройства, содержащие интерфейсы с последовательной передачей данных / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун, И.М. Рудкевич, О.И. Колесников; Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2013. – 10 с. – Деп. в ГУ «БелИСА» 26.02.2014, № Д20145.

#### **Тезисы докладов на научных конференциях**

13. Пискун, Г.А. Математическое описание процесса формирования источника тепла при воздействии мощного электромагнитного импульса на интегральные схемы / Г.А. Пискун // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ–2010»: матеріали 6-ї Міжнар. молодіжної наук.-техн. конф., Севастополь, Украина, 19–24 квітня 2010 г. / Севастоп. нац. техн. ун-т; редкол.: Ю.Б. Гимпилевич [і др.]. – Севастополь, 2010. – С. 420.

14. Пискун, Г.А. Расчет тепловых процессов во внутренних выводах интегральных схем при протекании импульсного тока / Г.А. Пискун // Сб. тезисов 28-ой науч.-техн. конф. ОАО «АГАТ-системы управления», Минск, Беларусь, 11–12 мая 2011 г. / ОАО «АГАТ-системы управления». – Минск, 2011. – С. 68–69.

#### **Патенты**

15. Способ испытания микроконтроллеров на устойчивость к воздействию электростатических разрядов: пат. 17253 Респ. Беларусь, МПК G 01R 31/26, G 11C 29/52 / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, О.А. Брылева; заявитель Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – № а 20120290; заявл. 28.02.2012; опубл. 30.06.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 142–143.

16. Способ разбраковки микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью после воздействия разряда статического электричества: заявка на изобретение № а 20140093 Респ. Беларусь, МПК G 01R 31/26 / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев; заявитель Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; заявл. 05.02.2014. (Положительное решение 14.04.2014).

## РЭЗІЮМЭ

Піскун Генадзій Адамавіч

### Функцыянальныя і эксплуатацыйныя характарыстыкі мікракантролераў пасля ўздзеяння электростатычных разрадаў

**Ключавыя словы:** электростатычны разрад, мікракантролер, кантроль.

**Мэта работы:** аналіз функцыянальных і эксплуатацыйных характарыстык мікракантролераў пасля ўздзеяння электростатычных разрадаў, мадэліраванне ўзнікаючых цеплавых палёў з улікам асаблівасцеў цеплапераносу і распрацоўка метадык тэхнічнай дыягностыкі на аснове аналізу пашкоджанняў у запісаным ва ўбудаваную флэш-памяць праграмным кодзе.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацавана мадэль пераносу цеплавой энергіі ў токаведучых элементах інтэгральных мікрасхем пры ўздзеянні разраду статычнай электрычнасці, адрозная ад вядомых выкарыстаннем паслядоўна складзеных плоскіх і цыліндрычнага целаў з рознымі цеплавымі супраціўленнямі, якая дазваляе вызначаць змены тэмпературы (у дыяпазоне 300 – 430 К пры напрузе разраду ад 2 да 8 кВ) і выяўляць найбольш уразлівыя да перагрэву элементы (вонкавы вывад інтэгральнай мікрасхемы ў вобласці максімальнага выгібу). Прапанавана метадыка аналізу працаздольнасці мікракантролераў, заснаваная на кантролі стану запісанага кода пры ступенчатым павышэнні напружання ўздзеючага электростатычнага разраду (крок 0,1 кВ), якая дазваляе вызначаць значэнне напружання (звыш 75 % ад яго гранічнага) і вырабляць адбракоўку патэнцыяльна ненадзейных мікрасхем. Распрацаваны спосаб функцыянальнага кантролю мікракантролераў, заснаваны на ўздзеянні разрадаў статычнай электрычнасці, які пацвярджае павелічэнне часу запісу праграмага кода да 16 разоў (пры напружанні разраду да 8 кВ), які дазваляе вызначаць магчымыя парушэнні ва ўбудаванай флэш-памяці мікрасхем. Прапанаваная лікавая мадэль разліку інтэнсіўнасці адмоў мікракантролераў, якая ўключае паправачны каэфіцыент, які ўлічвае тып уздзеяння (кантактны або паветраны) і напружанне разраду статычнай электрычнасці (для кантактнага разраду паправачны каэфіцыент роўны 1; для паветранага разраду роўны 0,75 пры напружанні разраду 8 кВ і 0,5 пры напружанні 15 кВ), якая дазваляе павысіць дакладнасць вылічэнняў да 50 % у параўнанні з вядомымі мадэлямі ацэнкі надзейнасці.

**Ступень выкарыстання:** вынікі ўкаранёны на ААТ «КБТЭМ-ОМА» і ААТ «ІНТЭГРАЛ» – кіруючая кампанія холдынгу «ІНТЭГРАЛ».

**Вобласць ужывання:** паўправадніковая прамысловасць, мікрапрацэсарныя сістэмы.

## РЕЗЮМЕ

**Пискун Геннадий Адамович**

### **Функциональные и эксплуатационные характеристики микроконтроллеров после воздействия электростатических разрядов**

**Ключевые слова:** электростатический разряд, микроконтроллер, контроль.

**Цель работы:** анализ функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров после воздействия электростатических разрядов, моделирование возникающих тепловых полей с учетом особенностей теплопереноса и разработка методик технической диагностики на основе анализа повреждений в записанном во встроенную флеш-память программном коде.

**Полученные результаты и их новизна:** разработана модель переноса тепловой энергии в токоведущих элементах интегральных микросхем при воздействии разряда статического электричества, отличающаяся от известных использованием последовательно составленных плоских и цилиндрического тел с различными тепловыми сопротивлениями, позволяющая определять изменения температуры (в диапазоне 300 – 430 К при напряжении разряда от 2 до 8 кВ) и выявлять наиболее уязвимые к перегреву элементы (внешний вывод интегральной микросхемы в области максимального изгиба). Предложена методика анализа работоспособности микроконтроллеров, основанная на контроле состояния записанного кода при ступенчатом повышении напряжения воздействующего электростатического разряда (шаг 0,1 кВ), позволяющая определять значение напряжения (свыше 75 % от его предельного) и производить отбраковку потенциально ненадежных микросхем. Разработан способ функционального контроля микроконтроллеров, основанный на воздействии разрядов статического электричества, подтверждающий увеличение времени записи программного кода до 16 раз (при напряжении разряда до 8 кВ), позволяющий определять возможные нарушения во встроенной флеш-памяти микросхем. Предложена численная модель расчета интенсивности отказов микроконтроллеров, включающая поправочный коэффициент, учитывающий тип воздействия (контактный или воздушный) и напряжение разряда статического электричества (для контактного разряда поправочный коэффициент равен 1; для воздушного разряда равен 0,75 при напряжении разряда 8 кВ и 0,5 при напряжении 15 кВ), позволяющая повысить точность вычислений до 50 % по сравнению с известными моделями оценки надежности.

**Степень использования:** результаты внедрены на ОАО «КБТЭМ-ОМО» и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

**Область применения:** полупроводниковая промышленность, микропроцессорные системы.

## SUMMARY

**Piskun Henadzi Adamovich**

**Functional and operational characteristics  
of microcontrollers after exposure to electrostatic discharge**

**Keywords:** electrostatic discharge, microcontroller, control.

**The object of study:** analysis of functional and operational characteristics of microcontrollers after exposure to electrostatic discharges occurring modeling of thermal fields taking into account peculiarities heat transfer and the development of methods of technical diagnostics based on analysis of damage recorded on the built-in flash memory programming code.

**The results and novelty:** a model of heat transfer to the current-carrying elements of integrated circuits when exposed to static electricity, differs from using the known successively composed flat and cylindrical bodies with different thermal resistances, allowing to determine the temperature change (range 300 – 430 K at a discharge voltage of 2 to 8 kV) and to identify the most vulnerable to overheating components (external output of an integrated circuit in the region of maximum bending). A method for analyzing performance microcontrollers based on the control state of the recorded code with stepwise increasing voltage electrostatic discharge (step 0.1 kV), which allows to determine the value of the voltage (more than 75 % of the limit) and make culling potentially unreliable chip. A method of functional control of microcontrollers based on the impact of static electricity, confirming the increase in the recording time code up to 16 times (at the discharge voltage of up to 8 kV), which allows to determine possible violations of internal flash memory chips. A numerical model for calculating the failure rate of microcontrollers is created, which includes a correction factor that takes into account the type of exposure (contact or air) and voltage static electricity discharge (for contact discharge correction factor is 1; for air discharge is 0.75 at the discharge voltage of 8 kV and 0.5 at a voltage of 15 kV), which allows to improve the accuracy of calculation to 50% compared with the known models of reliability evaluation.

**Degree of use:** results are implemented at JSC «KBTEM-OMO» and JSC «INTEGRAL» – managing company «INTEGRAL».

**Sphere of application:** semiconductor industry, microprocessor-based systems.

*Научное издание*

**Пискун Геннадий Адамович**

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

---

Подписано в печать

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная.

Гарнитура «Таймс».

Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л.

Уч.-изд. л.

Тираж 60 экз.

Заказ

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014  
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.  
220013, Минск, П. Бровки, 6.