

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

*На правах рукописи*

УДК 537.24:621.396.6

ВАРФОЛОМЕЕВ  
Владимир Валерьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО  
РАЗРЯДА НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения

Научный руководитель  
ГОНОВ Александр Николаевич  
кандидат технических наук, доцент

Минск 2016

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Гонов Александр Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Полубок Владислав Анатольевич,**  
кандидат технических наук, заведующий кафедрой микропроцессорных систем и сетей института информационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «20» января 2016 г. года в 11<sup>40</sup> на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч.корп., ауд. 413, тел.: 293-20-88, e-mail: [kafpiks@bsuir.by](mailto:kafpiks@bsuir.by).

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

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема повреждений и выхода из строя электронных средств в результате воздействия ЭСР далеко не нова. Достигнутый прогресс в ее решении значителен, однако полного и окончательного решения не ожидается даже в отдаленной перспективе. Причиной этого во многом является то, что развитие технологий электроники связано с микроминиатюризацией, повышением тактовых частот и снижением энергопотребления. Это обуславливает уменьшение физических размеров элементов, длительностей импульсов и другие следствия, снижающие устойчивость электронных средств к воздействию ЭСР.

Экономические потери от воздействия ЭСР весьма велики (в литературе можно встретить значение 8-33 % от общего количества произведенных электронных устройств). Разумеется, эта оценка приблизительная, произвести точный подсчет не представляется возможным, однако она показывает величину и степень важности проблемы. Если учесть, что вероятность поражения электронного устройства существует не только при эксплуатации, но и при производстве, транспортировке, хранении – в течение всего жизненного цикла, нетрудно согласится с порядком этой оценки.

Всследования в данной области, безусловно, являются актуальными. Можно отметить работы следующих авторов: Л.Н Кечиев., Е.Д. Пожидаев, С. Волдман, Д. Бирд, Т. Кюгельштадт, А.Е. Абрамешин, В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун, И.А. Галухин, Д.В. Трегубов, внесших значительный вклад в исследования обеспечения стойкости электронных средств к воздействию ЭСР. Поскольку описание протекания ЭСР в газе относится к физике плазмы, нельзя не упомянуть ученых из этой области: Ю.П. Райзера и Э.М. Базеляна.

В изучении процессов возникновения и протекания ЭСР, а также в испытаниях электронных средств на стойкость к его воздействию, большую роль играют различные модели ЭСР. Характерной особенностью большинства наиболее распространенных моделей является то, что они предусматривают протекание разряда контактного типа, т.е. при непосредственном контакте двух электродов, в этом случае через газовую среду ток не проходит. В то же время практика показывает, что в реальных условиях чаще происходит разряд через газовую среду (воздух). Многие модели эмпирически доводятся до максимального соответствия реальным бесконтактным ЭСР, однако достичь полного соответствия невозможно. А значит, наибольший интерес представляют модели ЭСР, протекающего в газовой среде.

Диссертационные исследования заключаются в разработке компьютерной модели ЭСР в газе и изучении на ее основе процессов образования, развития и протекания ЭСР с целью выработки способов защиты электронных средств от его воздействия и рекомендаций.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность темы исследования**

Проблема защиты электронных устройств от воздействия электростатического разряда становится все более актуальной. Во многом это связано с процессом микроминиатюризации электроники: уменьшение размеров полупроводниковых структур, уменьшение уровней сигналов, снижение энергопотребления и т.д. влекут повышение чувствительности к воздействию ЭСР, а также могут препятствовать применению традиционных способов защиты.

Очевидно, что необходимо вырабатывать новые и совершенствовать существующие методики защиты. Это невозможно без детального изучения самого электростатического разряда.

Однако многие вопросы, касающиеся физических процессов протекания электростатического разряда, являются недостаточно изученными, в частности мало сведений можно найти об электростатическом разряде в газовой среде, несмотря на то, что на практике он протекает гораздо чаще чем контактный. Одной из наиболее эффективных и прогрессивных методик изучения физических процессов является компьютерное моделирование, которое позволяет воспроизвести физический процесс требуемое число раз, при необходимых условиях, в требуемом масштабе и т.д. без значительных временных и материальных затрат.

## **Степень разработанности проблемы**

Существующие исследования в данной области достаточно обширны. В сфере теории физики плазмы, описывающей процессы ЭСР на элементарном уровне, большой вклад внесли Ю.П. Райзер и Э.М. Базелян. Интересны работы в области физического, математического и компьютерного моделирования таких авторов как Г.Ш. Болтачев, П.Н. Бондаренко, А.В. Самусенко, Б.Э. Пек. Велико значение работ в области теории возникновения ЭСР и защите электронных средств от его воздействия следующих исследователей и инженеров: Л.Н. Кечиев., Е.Д. Пожидаев, С. Волдман, Д. Бирд, Т. Кюгельштадт, А.Е. Абрамешин, И.А. Галухин, А. Строгонов, Д. В. Трегубов. В своих работах по электромагнитной совместимости темы ЭСР касается также Т. Уилльямс.

Несмотря на проработанность темы, она все еще оставляет широкое поле для дальнейших исследований. Так недостаточно изучен процесс газового разряда, не существует универсальной модели, наиболее полно его описывающей. Что касается непосредственно методик защиты электронных средств от воздействия ЭСР, необходимость их дальнейшего совершенствования обуславливается развитием электронной техники.

## **Цель и задачи исследования**

**Целью работы** является разработка имитационной модели ЭСР в газовой среде с помощью средств математического и компьютерного

моделирования, а также изучение на основе полученной модели процессов его протекания и разработка практических способов и рекомендаций по защите электронных средств от воздействия ЭСР.

Для выполнения поставленной цели можно сформулировать **следующие задачи**:

- на основе анализа методик испытаний электронных средств на устойчивость к воздействию ЭСР разработать и реализовать с помощью компьютерных средств моделирования математическую модель, описывающую возникновение и протекание ЭСР в газовой среде;
- исследовать зависимости физических параметров протекающего ЭСР от внешних факторов;
- разработать способы и практические рекомендации по защите электронных средств от воздействия ЭСР.

**Объектом** исследования выступают электронные средства и устройства, которые могут быть подвергнуты воздействию ЭСР.

**Предметом** исследования являются физические процессы, вызывающие изменения в электронных средствах при воздействии ЭСР.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения.

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

Теоретическую основу исследования составляют научные труды в области физики плазмы, работы по теории статического электричества и ЭСР, практические методики по защите электронных средств от воздействия ЭСР как отечественных, так и зарубежных авторов.

В ходе исследования используются такие научные методы как: моделирование, проведение экспериментов, анализ и синтез результатов экспериментов.

Для реализации полученной математической модели использовался программный пакет *COMSOL Multiphysics*.

### **Научная новизна.**

Научной новизной обладают предложенное зонное представление процесса протекания ЭСР, рекомендация по защите электронных средств, связанная с использованием факторов среды, способ схемотехнической защиты электронных средств.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Компьютерная модель образования и протекания ЭСР в газовой среде (на примере аргона), основанная на математическом описании образования и перемещения в среде элементарных частиц, имеющая следующие преимущества по сравнению с существующими:

- является полноценной моделью бесконтактного разряда;

– позволяет получить исчерпывающие сведения об энергетических параметрах ЭСР и времени его протекания.

2. Зонное представление протекания ЭСР, основанное на выделении четырех зон на графике зависимости тока разряда от приложенного напряжения: зоны отсутствия пробоя, зоны формирования канала, зоны постоянного эквивалентного сопротивления среды и зоны насыщения.

3. Экспериментальные зависимости энергетических и временных параметров протекания ЭСР в газовой среде от давления и температуры среды.

4. Способ схемотехнической защиты электронных средств от воздействия ЭСР, основанный на комплексном применении полупроводниковых ограничителей напряжения и вспомогательных элементов и предусматривающий определение параметров аварийного режима защищаемой цепи с помощью полученной модели.

#### **Теоретическая значимость.**

Теоретическую значимость работы представляют полученные в ходе проведения экспериментов данные и наблюдения, зависимости параметров протекания ЭСР от различных внешних факторов, сформулированное на их основе зонное описание ЭСР.

#### **Практическая значимость.**

Практическая значимость диссертации представлена способом и рекомендациями по защите электронных средств от ЭСР, а также возможностью использования разработанной модели для определения реальных значений амплитуды и длительности импульса разрядного тока ЭСР в газе при разработке схемотехнических способов защиты электронных средств.

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследования были представлены на следующих конференциях: XVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (13-15 ноября 2013г., РФ, г. Рязань), XXIII Международной научно-практической конференции по всем наукам «Прогрессивные процессы мировой научной мысли в исследованиях XXI века» (30 апреля 2015г., РФ, г. Казань), III Международной научно-практической конференции «Новейшие исследования в современной науке: опыт, традиции, инновации» (28-29 апреля 2015г., РФ, г. Москва), Международной научно-практической конференции «Молодёжный форум: технические и математические науки» (9-12 ноября 2015г., РФ, г. Воронеж).

Отдельные положения диссертации, в частности выработанные методика и рекомендации по защите электронных средств, внедрены в конструкторскую практику на предприятии ООО «ИТТАС» (РБ, г. Минск), а также могут быть использованы в учебном процессе.

## **Опубликование результатов диссертации**

Основные положения работы и результаты изложены в шести опубликованных работах общим объемом 20 с. (авторский объем 20 с.).

## **Структура и объем работы**

Структура работы обусловлена целью и задачами, ее спецификой. В структуру работы входят: перечень условных обозначений, общая характеристика, введение, три главы, разбитые на разделы, заключение, библиографический список и четыре приложения. Объем работы 86 с., в ней содержится 6 таблиц, 59 рисунков в основном тексте и 15 в приложении, библиографический список включает 56 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обосновывается актуальность ведения разработок по моделированию процессов ЭСР и его воздействия на электронные средства, обосновываются и формулируются цели и задачи исследования.

**Общая характеристика** работы описывает цели и задачи работы, устанавливает объект и предмет исследования. Проанализировано текущее состояние проработанности области исследования, указана связь данной работы с уже существующими. Указаны теоретическая основа и научная методология. Общая характеристика дает представление о теоретической и практической значимости исследования, его научной новизне. Также она содержит сведения об апробации результатов исследования.

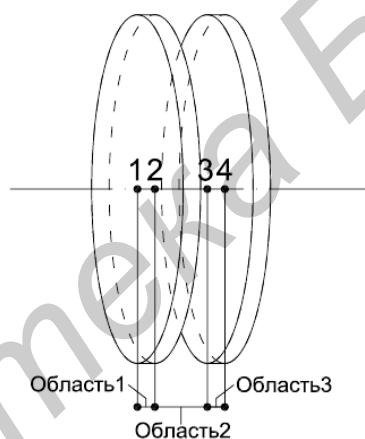
**Первая глава** посвящена описанию существующих моделей ЭСР и современных компьютерных средств моделирования физических процессов. В ней рассматриваются модели как компьютерно-математические, так и физические, стендового типа, базирующиеся на различных принципах. Отмечаются достоинства, и недостатки каждого типа. Наибольший интерес представляет тип модели, основанный на математическом описании физических процессов, происходящих в плазме, он обладает следующими преимуществами: описывает именно протекание ЭСР в газовой среде, что наиболее часто встречается на практике; позволяет изучить процессы протекания ЭСР не только в газовой среде, но и на границах раздела; позволяет изучить процессы образования и развития ЭСР; позволяет анализировать энергетические показатели. Также приведено сравнение нескольких современных систем автоматизации инженерных расчетов, произведены анализ и обоснования выбора для разработки программного пакета *COMSOL Multiphysics*.

**Вторая глава** посвящена непосредственно разработке модели ЭСР и исследованиям на ее основе. В ней дается физико-математическое описание модели. Оно включает в себя основные принципы построения модели, формулы для расчета параметров, описание реакций, протекающих в газовой среде. Модель основывается на математическом описании физических процессов, происходящих в плазме – ионизации, перемещении заряженных частиц и их рекомбинации (жидкостная модель). Ключевыми величинами яв-

ляются концентрация электронов, их установившаяся средняя энергия и температура. Значения величин вычисляются путем решения дифференциальных уравнений дрейф-диффузии.

Идет речь об исходных данных для построения модели (формулы реакций, физические константы, различные коэффициенты, переменные, начальные значения переменных, виды распределений случайных величин, свойства материалов) и способа их задания в программной среде.

Уделено внимание построению области моделирования. Геометрически модель представляет собой два дисковых электрода, разделенные зазором, заполненным аргоном. Диаметр электродов составляет 10мм, толщина каждого электрода – 1мм, величина зазора 2мм. Поскольку модель является одномерной, область моделирования представляет собой три отрезка: область диэлектрика, имитирующую заряженное тело, область газа, и область проводника, имитирующую вывод электронного компонента. Схематически область моделирования представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Область моделирования**

Также описаны граничные условия (переход электронов на поверхность электрода, вторичная эмиссия, рекомбинация ионов, прилипание ионов) и их задание в программной среде.

Далее представлены результаты моделирования на примере пяти моделей с различными начальными условиями. Определены основные закономерности поведения ЭСР при увеличении приложенного напряжения. Отслеживалось поведение заряженных частиц, в частности обнаружено разрастание и разделение областей их концентрации при росте напряжения.

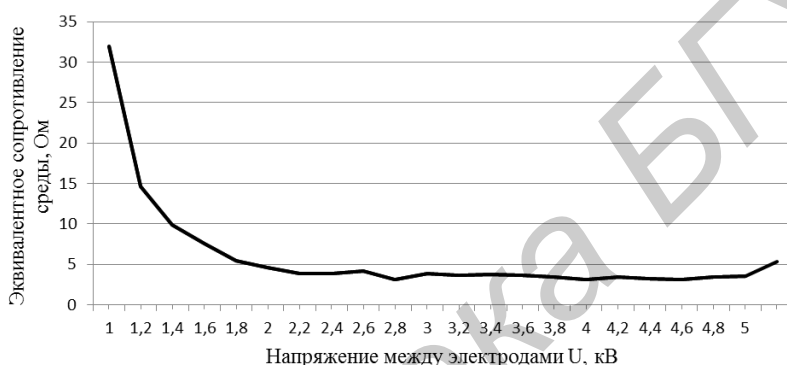
Приведено исследование энергетических параметров ЭСР. Получена зависимость тока разряда от приложенного напряжения для диапазона от 600 до 5500 В, она приведена на рисунке 2.





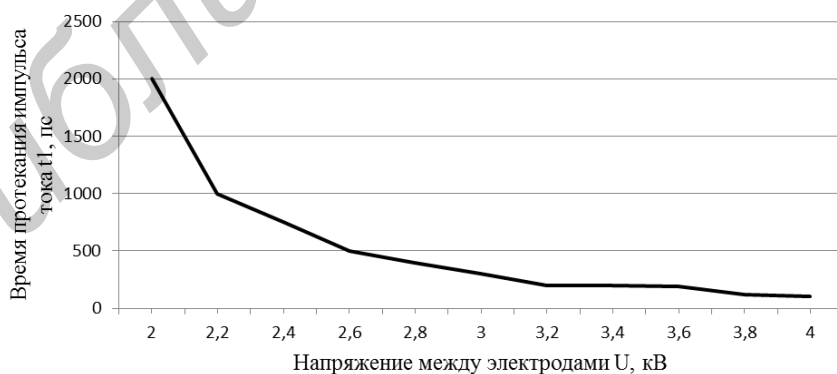
**Рисунок 2 – Зависимость максимально достигаемого тока разряда от приложенного напряжения**

Зависимость имеет нелинейный характер, график тока возрастает. Также получена зависимость для напряжения на вторичном электроде, построен график эквивалентного сопротивления среды (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Зависимость эквивалентного сопротивления газовой среды от напряжения между электродами**

Также получена зависимость длительности токового импульса от напряжения (рисунок 4). Наблюдается появление короткого первичного токового импульса, имеющего значительно большую амплитуду.



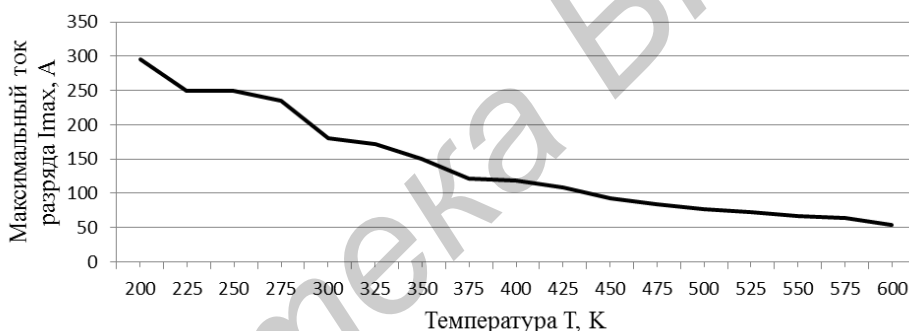
**Рисунок 4 – Зависимость длительности первичного импульса тока от напряжения между электродами**

Получены зависимости максимального тока разряда (рисунок 5), длительности токового импульса, напряжения на вторичном электроде от давления газа для диапазона от 0,5 до 2,5 атмосфер.



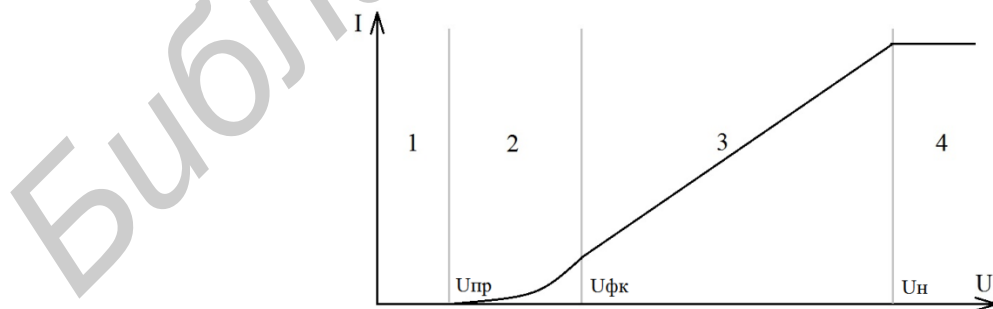
**Рисунок 5 – Зависимость максимального тока разряда от давления газа**

Исследовано влияние температуры среды на протекание ЭСР. Получены аналогичные для диапазона от 200 до 600 К. Зависимость максимального тока разряда от температуры среды приведена на рисунке 6. Наблюдается существенное снижение интенсивности процессов ЭСР при повышении температуры.



**Рисунок 6 – Зависимость максимального тока разряда от температуры среды**

На основании полученных данных предложено зонное представление протекания ЭСР, его графическое представление приведено на рисунке 7.



*1 – зона отсутствия пробоя; 2 – зона формирования проводящего канала; 3 – зона постоянного эквивалентного сопротивления среды; 4 – зона насыщения.*

**Рисунок 7 – Зонное представление протекания электростатического разряда**

**Третья глава** посвящена разработке методик и рекомендаций по защите электронных средств от воздействия ЭСР. Она начинается с рассмотрения вопросов систематизации и классификации методов защиты, базовых принципов ее построения. Затем предлагаются методы защиты электронных

средств на основе экспериментальных данных. Так предложен метод защиты электронных средств от воздействия ЭСР, основанный на использовании при эксплуатации повышенной температуры и пониженного давления. Разумеется, этот метод специфичен, но его применение представляется возможным, к примеру, в аэрокосмической аппаратуре. Также предложен способ схемотехнической защиты, основанный на применении полупроводниковых ограничителей напряжения совместно со вспомогательными элементами. Общая схема приведена на рисунке 8.

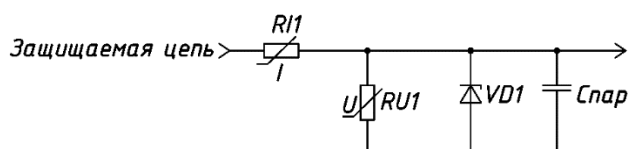


Рисунок 8 – Обобщенная схема защиты от электростатического разряда

Ключевую роль играет супрессор  $VD1$  – он обеспечивает защиту от наиболее опасных импульсов перенапряжения, имеющих малую длительность. Элемент  $R11$  –  $PPTC$ -термистор – несет вспомогательную функцию, ограничивает ток через супрессор.  $RU1$  – варистор также несет вспомогательную функцию, срабатывает при появлении длительных импульсов перенапряжения, имеющих большую мощность.  $C_{пар}$  – паразитная емкость.



Рисунок 9– Методика выбора компонентов схемы защиты

Задачу определения параметров аварийного режима можно успешно решить с использованием полученной модели.

В **заключении** поведены итоги работы, сделаны выводы, касающиеся преимуществ разработанной модели, ее ценности для дальнейших изыска-

ний. Дана оценка экспериментальным данным, основанным на них рекомендациям по защите электронных средств от воздействия ЭСР.

**Библиографический список** содержит список использованных источников и список опубликованных работ автора.

**Приложение** содержит графический материал – презентацию, листинг файла, описывающего поведение частиц в аргоне при ионизации, акты внедрения результатов исследования в учебный процесс и производство.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана компьютерная модель образования и протекания ЭСР в газовой среде, основанная на математическом описании процессов образования и перемещения элементарных частиц, имеющая ряд преимуществ: является полноценной моделью бесконтактного разряда; позволяет получить сведения об энергетических и временных параметрах разряда; результаты моделирования наглядны и легко поддаются интерпретации и анализу.

2. Получена зависимость интенсивности протекания ЭСР и его энергетических параметров от напряжения между электродами. На основе этих данных предложено зонное представление развития разряда, график зависимости делится на четыре области: отсутствия пробоя, формирования проводящего канала, постоянного эквивалентного сопротивления среды, насыщения.

3. Отмечены особенности поведения областей концентрации свободных электронов, ионов и атомов в возбужденном состоянии. С ростом приложенного напряжения области расширялись, происходило их расслоение.

4. В области постоянного эквивалентного сопротивления обнаружено протекание первичного токового импульса с крайне малой длительностью, представляющий серьезную опасность для электронных средств.

5. Получена зависимость интенсивности протекания ЭСР от давления и начальной температуры газовой среды. Отмечено существенное снижение интенсивности разряда с ростом температуры и снижении давления.

6. Разработан способ схмотехнической защиты электронных средств от воздействия ЭСР, основанный на комплексном применении ПОН и вспомогательных элементов защиты. Он предусматривает необходимость определения параметров аварийного режима в защищаемой цепи. Эта задача может быть успешно решена при помощи разработанной модели.

Полученная модель имеет потенциал развития. Так перспективным представляются создание на ее основе более подробных моделей с большим количеством границ раздела сред, другим перспективным направлением является расширение номенклатуры газовых сред.

### Список опубликованных работ

[ 1–А] Варфоломеев, В.В. Математическое моделирование электростатического разряда, протекающего по бесконтактному типу / В.В. Варфоломе-

ев, Г.А. Пискун, П.А. Нитиевский // Новые информационные технологии в научных исследованиях «НИТ-2013»: материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 13-15 ноября 2013 г. / Рязань: ФГБОУ ВПО «РГРТУ». – 2013. – С.80-81.

[ 2–А] Нитиевский, П.А. Выбор тестовых полупроводниковых структур для испытаний на устойчивость к электромагнитным помехам / П.А. Нитиевский, В.В. Варфоломеев, Г.А. Пискун // Новые информационные технологии в научных исследованиях «НИТ-2013»: материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 13-15 ноября 2013 г. / Рязань: ФГБОУ ВПО «РГРТУ». – 2013. – С.112-114.

[ 3–А] Варфоломеев, В.В. Исследование воздействия электростатического разряда на электронные средства на основе компьютерной модели / В.В. Варфоломеев, А.Н. Гонов // Новейшие исследования в современной науке: опыт, традиции, инновации: сборник научных статей III Международной научно-практической конференции, Москва, 28-29 апреля 2015 г. / Москва: Научно-издательский центр «Открытие» . – 2015. – С. 45-48.

[ 4–А] Варфоломеев, В.В. Моделирование электростатического разряда в газовой среде / В.В. Варфоломеев // Интеграция мировых научных процессов как основа общественного прогресса: материалы Международной научно-практической конференции Общества Науки и Творчества, Казань 30 апреля 2015г. / Казань. – 2015. – С. 57-64.

[ 5–А] Варфоломеев, В.В. Исследование протекания процессов электростатического разряда в газовой среде на основе компьютерной модели / В.Ф. Алексеев, В.В. Варфоломеев, Г.А. Пискун // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции, Воронеж 9-12 ноября 2015 г. / Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛУ». – 2015. № 7 часть 1.– С. 54-57.

[ 6–А] Варфоломеев, В.В. Зависимость интенсивности протекания электростатического разряда бесконтактного типа от параметров среды / В.Ф. Алексеев, В.В. Варфоломеев, Г.А. Пискун //Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции, Воронеж 9-12 ноября 2015 г. / Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛУ». – 2015. № 7 часть 1.– С. 58-61.

# РЭЗІЮМЭ

Варфаламееў Уладзімір Валер'евіч

## Мадэляванне ўздзеяння электростатычнага разраду на электронныя сродкі

**Ключавыя словы:** электростатычны разрад, матэматычнае мадэляванне, камп'ютарнае мадэляванне, фізіка плазмы, абарона ад электростатычнага разраду.

**Мэта працы:** распрацоўка мадэлі ЭСР у газавым асяроддзі, вывучэнне на яе базе працэсаў працякання ЭСР, фармулёўка практычных метадаў і рэкамендацый па абароне электронных сродка ад яго уздзеяння.

**Атрыманя рэзультаты і іх навізна:** рэалізавана з дапамогай сродкаў камп'ютэрнага мадэлявання матэматычная мадэль бескантактнага ЭСР, заснаваная на апісанні руху элементарных часціцаў. У выніку эксперыментаў, якія праводзіліся на базе атрыманай мадэлі, атрыманы залежнасці энергетычных і часовых параметраў разраду ад прыкладзенай напругі і фактараў асяроддзя. Прыведзена зоннае апісанне працякання ЭСР. Выпрацаваны спосаб абароны электронных сродкаў ад уздзеяння ЭСР, заснаваны на комплексным выкарыстанні супрэсараў разам з дапаможнымі элементамі і ўжыванні атрыманай мадэлі для выбару тыпу элементаў, а таксама рэкамендацыі, заснаваныя на выкарыстанні фактараў асяроддзя.

**Ступень выкарыстання:** вынікі ўкаранёны на ТАА "ІТТАС".

**Вобласць ужывання:** канструяванне электроннай тэхнікі.

## РЕЗЮМЕ

Варфоломеев Владимир Валерьевич

### Моделирование воздействия электростатического разряда на электронные средства

**Ключевые слова:** электростатический разряд, математическое моделирование, компьютерное моделирование, физика плазмы, защита от электростатического разряда.

**Цель работы:** разработка модели ЭСР, протекающего в газовой среде, изучение на ее базе процессов ЭСР, выработка практических способов и рекомендаций по защите электронных средств от его воздействия.

**Полученные результаты и их новизна:** реализована с помощью средств компьютерного моделирования математическая модель бесконтактного ЭСР в газе, основанная на описании движения элементарных частиц. По результатам экспериментов, проведенных на основе полученной модели, получены зависимости энергетических и временных параметров разряда от приложенного напряжения и факторов среды. Приведено зонное представление протекания ЭСР. Разработан способ защиты электронных средств от воздействия ЭСР, основанный на комплексном применении супрессоров совместно со вспомогательными элементами и использовании полученной модели для выбора типа элементов, а также рекомендации, основанные на использовании факторов среды.

**Степень использования:** результаты внедрены на ООО «ИТТАС».

**Область применения:** конструирование электронной техники.

## SUMMARY

Varfolomeev Vladimir Valer'evich

### Modeling of electrostatic discharge impact on electronic

**Keywords:** electrostatic discharge, mathematical modeling, computer-aided modeling, plasma physics, ESD protection.

**The object of study:** developing of ESD model in gaseous environment, study of ESD processes, practical ESD protection guidelines developing.

**The results and novelty:** the mathematical model of contactless ESD implemented with computer-aided simulation. The model based on the description of the motion of elementary particles. As a result of model-based experiments the dependence of the energy and time parameters of discharge on the applied voltage, and environmental factors was obtained. A theory describing the ESD equivalent voltage characteristic was suggested. The methodology of ESD protection was developed which based on complex using TVS-diodes with auxiliary components and using current model for elements type choosing. Also suggested protection guidelines based on environmental factors.

**Degree of use:** results are implemented at "ITTAS" ltd.

**Sphere of application:** electronics design.