

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

На правах рукописи

УДК 53.089.62

ЛИСОВСКИЙ
Андрей Александрович

**РАЗРАБОТКА И АТТЕСТАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО
КАЛИБРОВОЧНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА
УСТОЙЧИВОСТЬ К ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ РАЗРЯДАМ**

АВТОРЕФЕРАТ

магистерской диссертации на соискание степени
магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии
проектирования электронных систем»

Научный руководитель
д-р.техн.наук, профессор
Матюшков В.Е.

Минск 2015

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

Научный руководитель: **Матюшков Владимир Егорович,**
доктор технических наук, профессор, главный инженер ОАО «КБТЭМ-ОМО»

Рецензент: **Сидоров Игорь Иванович,**
Кандидат физико-математических наук, начальник управления подготовки кадров высшей квалификации учреждения образования «Белорусский государственный университет»

Защита диссертации состоится «24» января 2015 г. года в 9⁰⁰ часов 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, 4 уч.корп., ауд. 804, тел.: 293-89-92, e-mail: kafei@bsuir.by.

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

ВВЕДЕНИЕ

С тех пор как впервые было разработано радиоэлектронное средство, человечество столкнулось с проблемой электростатического разряда в радиоэлектронном оборудовании. Сегодня проблема статического электричества и электростатического разряда является камнем преткновения во многих приложениях: быстродействующие электронные системы и устройства, чувствительные интегральные схемы и полупроводниковые компоненты, космические и летательные аппараты и их оборудование. Невозможно говорить о качестве продукции в электронике, не рассматривая вопросы статического электричества и электростатического разряда. Промышленные эксперты оценивают потери из-за действия статического электричества на электронное оборудование и его компоненты от 8 до 33%.

Важной проблемой, привлекающей внимание специалистов, остается совершенствование технологических процессов в электронике в направлении чистоты производственных процессов, создание защищенных зон с минимальным уровнем загрязнения частицами пыли. Здесь постепенно совершенствуются материалы, оснастка оборудования, а также внедряется комплекс мероприятий, целью которых является устранение условий возникновения электростатических зарядов. Но опасность поражения электронного оборудования остается не только в процессе производства, но и при упаковке, транспортировке, хранении и эксплуатации. Здесь уже следует рассматривать не только само оборудование, но и его окружение в реальной ситуации.

Поэтому опасность воздействия на оборудование электростатических зарядов существует на всем жизненном цикле электронных средств.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Все радиоэлектронные средства, выпускаемая в настоящее время чувствительна к электростатическому разряду. Воздействие электростатического разряда на современные электронные компоненты может вызывать их необратимое повреждение или скрытые дефекты.

Источниками электризации могут быть как перенос электростатических зарядов со стороны оборудования и персонала для наземной аппаратуры, так и потоки высокоэнергетических заряженных частиц для бортовой аппаратуры летательных аппаратов. Источниками разряда может служить контакт радиоэлектронной аппаратуры с носителями заряда: человеком (МТЧ-модель), с оборудованием (ММ-модель), или заряженным радиоэлектронным средством с заземленным оборудованием (МЗК модель).

Документ ESDA вводит в рассмотрение новый источник электро-

статического разряда – от заряженного прибора (МЗП модель). Рассмотрение данного вопроса началось только в 2007-2008 годах, точные данные по МЗП ЭСР отсутствуют, и исследования в данном направлении являются актуальными.

На основании полученных результатов моделирования возможно обоснование необходимых методик контроля статической электризации для оценки реальной электромагнитной обстановки. Применение методик контроля позволяет выявить опасность возникновения ЭСР и оценить эффективность мероприятий по предотвращению ЭСР.

Степень разработанности проблемы

Проблемам защиты от электростатического разряда посвящено значительное количество монографий и научных публикаций как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Так, Кечиевым Л. Н., Кривовым А. С., Рогинским В.Ю., Кириловым В. Ю., Марченко М. В., Горловым М.А., Строгоновым А.С. и другими авторами были рассмотрены физические основы возникновения статического электричества и его проявления в виде электростатического разряда, механизмы его воздействия на электронную аппаратуру, методы и средства ее защиты на стадиях схмотехнического и конструкторского проектирования, а также на этапах изготовления, транспортировки, монтажа на объекте и при эксплуатации, также рассмотрены тенденции развития требований к защите электронных устройств от электростатических разрядов.

Вместе с тем, несмотря на значительное количество публикаций по данной теме исследования, вопросы, связанные с защитой от электростатического разряда остаются до настоящего времени недостаточно изученными. Как следствие, возникает объективная необходимость дальнейшего исследования проблемы обеспечения надёжности функционирования электронных устройств в условиях воздействия электростатических разрядов.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является повышение устойчивости радиоэлектронных средств к поражающим факторам электризации за счёт выявления влияния характеристик печатного монтажа на порог отказа электронных компонентов при ЭСР и принятия мер по предотвращению ЭСР.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи:**

- провести обзор и анализ источников электростатического разряда и измерения характеристик электростатических полей, моделей испытаний на воздействие электростатического разряда, методов и средств защиты от электростатического разряда;
- провести анализ формирования электростатического разряда для воспроизведения импульсов с напряжением до 8 кВ путем воздушного и контактного разряда;
- провести моделирование электростатического разряда на элек-

тронные компоненты по модели заряженного компонента(МЗК).

Объектом исследования является полупроводниковый прибор.

Предметом исследования является компьютерное моделирование воздействия электростатического разряда на полупроводниковые приборы.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

Теоретическую базу диссертационного исследования составили научные труды отечественных и зарубежных ученых, теоретические концепции и практические разработки отечественных и зарубежных ученых по проблемам защиты полупроводниковых приборов от электростатического разряда.

Методология исследования основывается на использовании следующих методов:

- математическое моделирование;
- сравнительный анализ результатов расчетов и экспериментальных данных;

В ходе работы использован пакет программ моделирования Qucs.

Информационная база в качестве основной информационной базы исследования использованы профильные нормативно-справочные материалы, научные исследования, монографические публикации, а так же интернет ресурсы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в результате моделирования было установлено, что порог отказа электронного компонента при электростатическом разряде по модели заряженного прибора составляет 50% и менее, от порога отказа при электростатическом разряде по модели заряженного компонента.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для расчёта порога отказа электронных компонентов при электростатическом разряде по модели заряженного прибора достаточно представить объект воздействия электростатического разряда (печатный узел) в виде эквивалентной электрической схемы с сосредоточенными параметрами (эквивалентная индуктивность и ёмкость).

2. Порог отказа МДП-транзисторов при электростатическом разряде по модели заряженного прибора снижается на 50% и более по сравнению с порогом отказа при электростатическом разряде по модели заряженного компонента. Снижение порога отказа подтверждается результатами моделирования. Степень снижения порога отказа определяется эквивалентной ёмкостью печатного монтажа, а так же габаритами платы.

3. С помощью моделирования в программе Qucs было установлено, что печатные платы могут накопить статический заряд который может привести к тому, чтобы электростатический разряд начал развиваться в

соответствии с моделью заряженного прибора.

Теоретическая значимость результаты и методы рассмотренные в диссертации могут быть полезными как с теоретической, так и с практической точек зрения специалистами в области изучения электростатического разряда. Диссертационное исследование способствует дальнейшему развитию исследований по совершенствованию методик моделирования воздействия электростатического разряда на радиоэлектронные средства.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что на основе методики схемотехнического моделирования воздействия электростатического разряда на МОП-транзисторы с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом Qucs имеет применение для выявления чувствительности печатных узлов различных изделий спецтехники к электростатическим разрядам на этапе разработки конструкторской документации.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследования были неоднократно представлены на IV международной молодежной научно-практической конференции (Научные стремления – 2013), в III молодежной инновационной конференции (Наука и бизнес '13), 49-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 2013).

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в четырех опубликованных работах общим объемом 5,0 п.с. (авторский объем 5,0 п.с.).

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем диссертации – 67 страниц. Работа содержит 3 таблицы, 35 рисунков. Библиографический список включает 47 наименований.

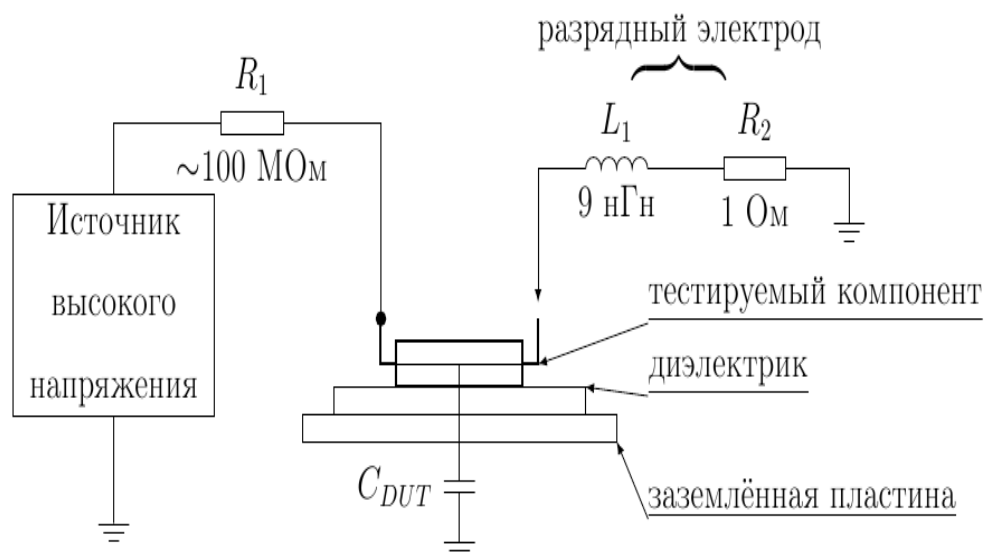
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы по моделированию электростатического разряда в соответствии с заданной моделью, 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 опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В первой главе выполнен анализ существующих методов моделирования воздействия ЭСР на печатные узлы, методов и аппаратуры для контроля статического электричества в условиях производства.

Если электронный компонент, несущий статический заряд, затем прикоснется к какому-либо металлическому предмету, то произойдет быстрый разряд. Соответствующая модель известна как модель заряженного компонента. Существуют два метода испытаний на воздействие электростатического разряда в соответствии с моделью заряженного компонента: метод прямого заряжения и модель поля индуцируемого заряженным устройством. Схема установки для испытаний на воздействие электростатического разряда в соответствии с моделью заряженного компонента показана на рисунке 1.



C_{DUT} – распределённая ёмкость корпуса на землю; R_1 – зарядный резистор;
 R_2 – измерительный резистор; L_1 – паразитная индуктивность

Рисунок 1 – Модель испытаний на воздействие МЗК ЭСР

Другим методом испытания является модель поля индуцируемого заряженным устройством FCDM (Field Induced Charged Device Model) — модель заряженного компонента в результате электростатической индукции. Методика испытаний на воздействие электростатического разряда в соответствии с моделью заряженного компонента регламентирована стандартами.

Если компонент смонтирован на печатной плате, а затем подвергается разряду вместе с платой, то для такого случая предлагают ввести особую модель электростатического разряда, называемую моделью заряженного прибора.

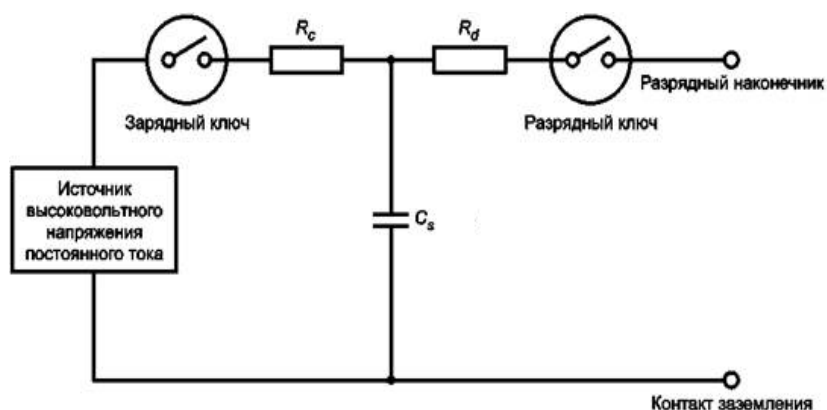
В результате проведённого анализа отечественных и зарубежных источников выявлено, что в настоящее время работы на русском языке по моделированию воздействия электростатического разряда по модели заряженного прибора на электронные компоненты немногочисленны.

Исследование влияния характеристик печатного монтажа на порог отказа компонента при электростатическом разряде в соответствии с моделью заряженного прибора является актуальным. Актуальна разработка методик расчёта порога отказа электронных компонентов при электростатическом разряде в соответствии с моделью заряженного прибора и методик моделирования воздействия электростатического разряда.

Выявив с помощью моделирования на этапе разработки конструкторской документации опасный для радиоэлектронного устройства уровень статического потенциала, на этапе производства необходимо использовать методы и аппаратуру для контроля статического электричества, чтобы выявить и устранить источник электризации. В настоящее время актуальна разработка такой аппаратуры для применения в производственных условиях.

Во второй главе приведен анализ формирования электростатического разряда для воспроизведения импульсов с напряжением до 8 кВ путем воздушного и контактного разряда

Для формирования импульсов электростатического разряда используют генератор, упрощенная схема которого приведена на рисунке 2.



R_c – зарядный резистор; C_s – накопительный конденсатор;
 R_d – разрядный резистор

Рисунок 2 – Упрощенная схема испытательного генератора

Разряд создается при замыкании реле внутри генератора. Конструкция специальных реле обеспечивает хорошую воспроизводимость форм разрядного тока. Однако из-за того, что реле является внутренним и не является точкой, в которой испытательный генератор соприкасается с испытуемым

техническим средством, появление разрядного тока отличается от возникновения разряда от человека.

Идеальная форма разрядного тока испытательного генератора представлена на рисунке 3.

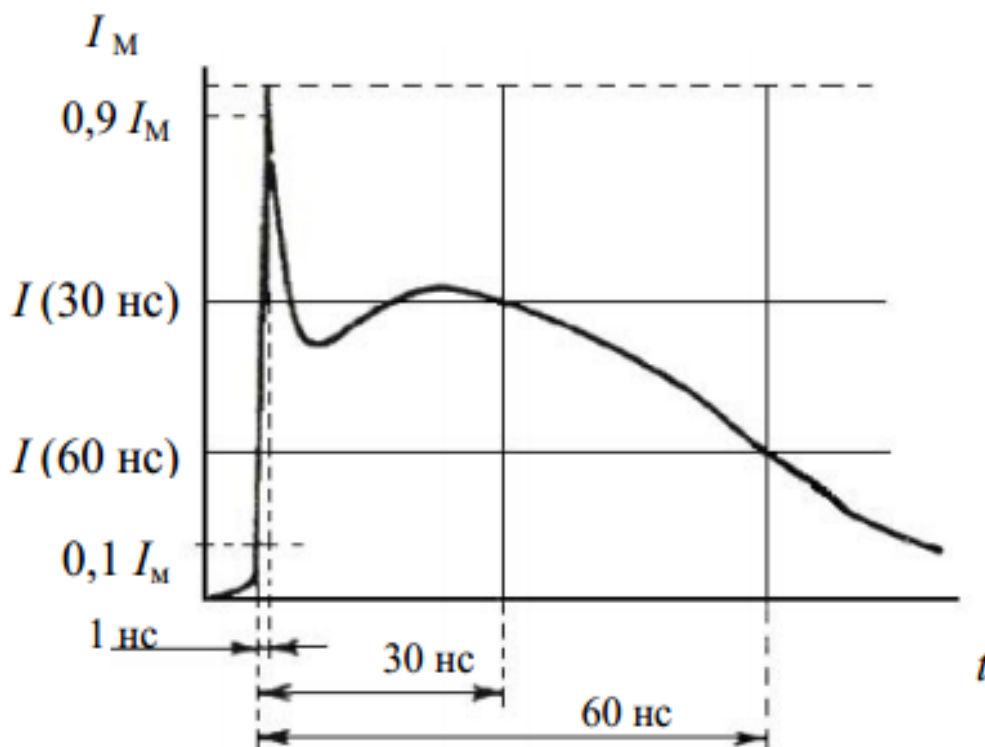


Рисунок 3 – Форма разрядного тока испытательного генератора

В конструкции испытательного генератора должны быть предусмотрены устройства, предотвращающие создание непреднамеренных излучаемых или кондуктивных электромагнитных помех импульсного или непрерывного характера с тем, чтобы паразитные эффекты не оказывали влияния на испытуемое или вспомогательное оборудование.

Таким образом актуальна разработка испытательного генератора который будет стремиться повторить форму импульса происходящего при электростатическом разряде.

В **третьей главе** приведено описание методики моделирования порога отказа МДП-транзисторов при МЗП ЭСР при помощи схемотехнического моделирования.

Сущность методики состоит в том, что объект воздействия ЭСР представляется в виде эквивалентной электрической схемы, а физические параметры объекта — в виде параметров элементов такой эквивалентной схемы. В ходе исследований была построена схемотехническая модель воздействия

МТЧ ЭСР на МДП транзистор и произведён сравнительный анализ результатов моделирования переходного процесса и полученного порога отказа с экспериментально полученными результатами, приведённые фирмой изготовителем. Можно сделать вывод о том, что модели МДП-транзисторов, имеющиеся в программе Qucs можно использовать для моделирования воздействия на них ЭСР без каких-либо доработок. Критерием отказа транзистора при моделировании будет служить превышение напряжением затвор-исток допустимой величины в 75-80 В, которая приводится предприятием-изготовителем транзисторов в справочных данных.

Сначала было произведено моделирование воздействия МЗК ЭСР без печатной платы. Схема модели МЗК ЭСР в программе Qucs показана на рисунке 4.

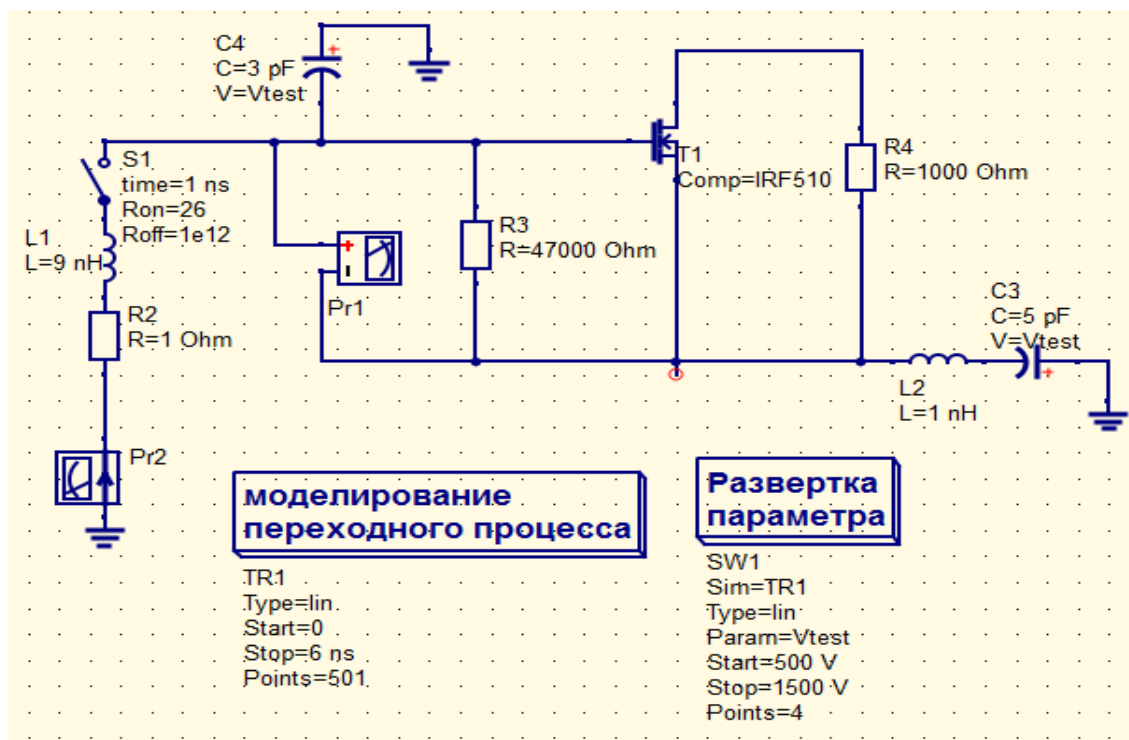


Рисунок 4 – Схема модели воздействия ЭСР по модели заряженного компонента на транзистор IRF510

Сравнение формы тока ЭСР, полученной в результате моделирования, и указанной в стандарте показало, что физические процессы при МЗК ЭСР воспроизводятся моделью корректно.

Произведём моделирование СВМ ЭСР для транзистора, установленного на печатной плате. Система печатных проводников связана с истоком МДПтранзистора. Для моделирования СВМ ЭСР в данном случае увеличим ёмкость C_2 на рисунке 4 до значения, равного ёмкости системы печатных

проводников, связанных с истоком транзистора. Примем данную ёмкость равной 190 пФ.

Графики напряжения на затворе при ЭСР показаны на рисунке 5. Уже при напряжении тестирования 250 В перенапряжения на затворе транзистора достигают 80 В, что соответствует отказу транзистора. Таким образом порог отказа транзистора снизился на 75 %.

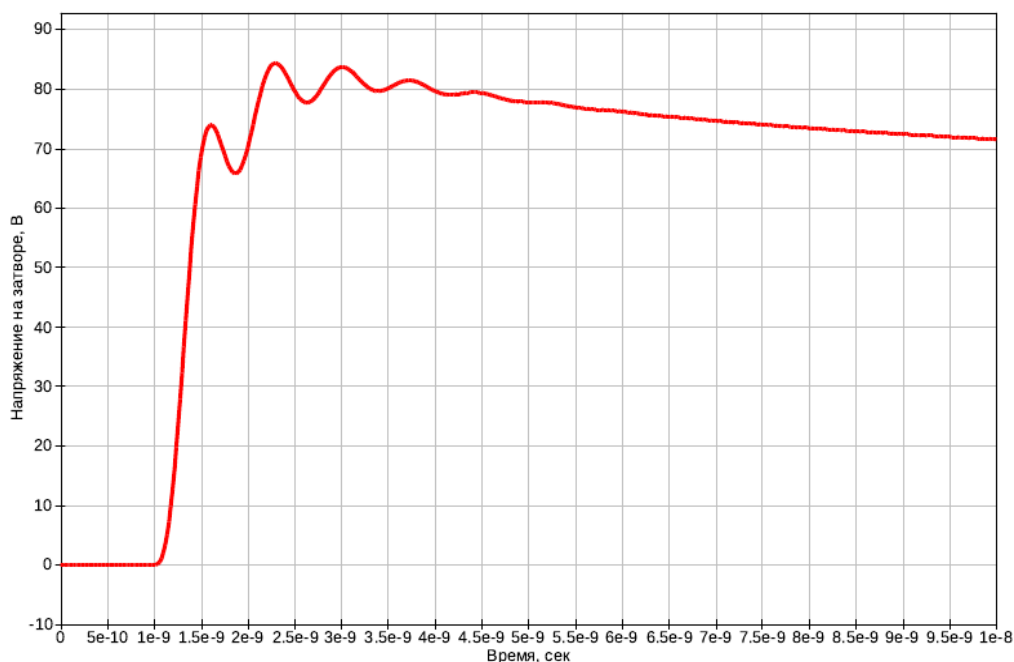


Рисунок 5 – Напряжение на затворе МДП-транзистора при ЭСР

После этого произвели параметрический анализ влияния ёмкости печатной платы на порог отказа МДП-транзистора в результате МЗП ЭСР. Осциллограммы импульсных перенапряжений на затворе транзистора при ЭСР показаны на рисунке 6.

Увеличение ёмкости затвор-исток транзистора снижает его восприимчивость к ЭСР. Возрастание ёмкости печатной платы приводит к неограниченному росту перенапряжений в цепи затвора при МЗП ЭСР. Данная схема ЭСР моделирует наихудший случай развития разряда — непосредственный разряд на вывод затвора транзистора. В результате моделирования полностью подтвердились данные зарубежных публикаций.

Рассмотренная в ходе исследований концепция построения моделей воздействия ЭСР на МДП-транзисторы позволяет моделировать перенапряжения, возникающие при МЗК ЭСР, имея в распоряжении Spice-модель транзистора, конструктивные данные печатной платы и пробивное напряжение подзатворного диэлектрика транзистора.

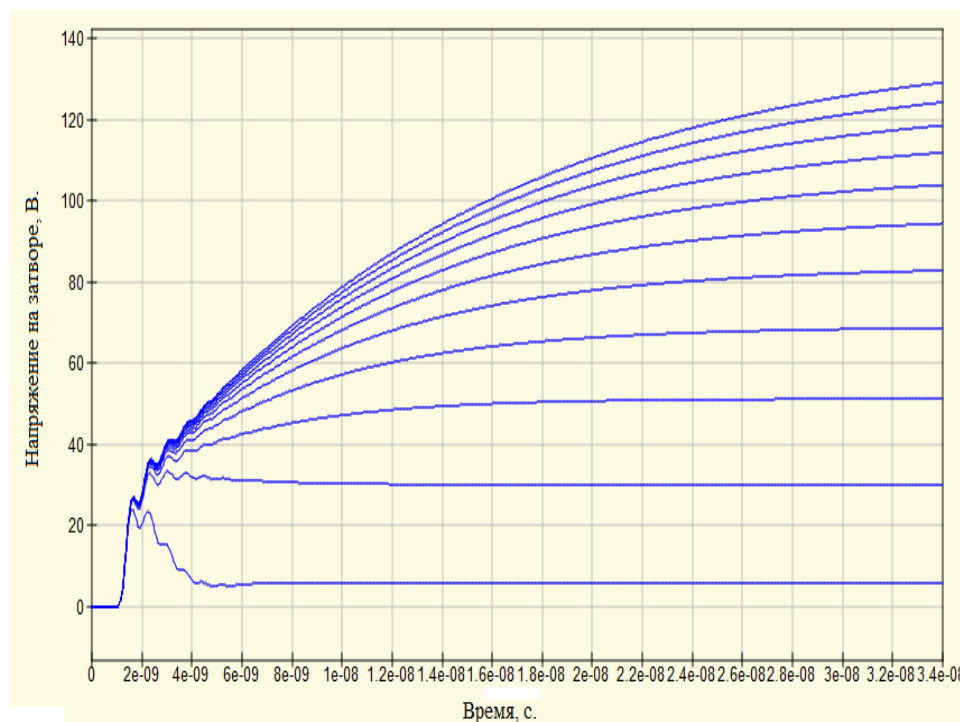


Рисунок 6 – Напряжение на затворе МДП-транзистора при ЭСР для ёмкости печатной платы от 30 пФ до 1000 пФ

Моделирование МЗП ЭСР показывает, что массивные медные печатные проводники накапливают дополнительный статический заряд, который при разряде полностью проходит через электронный компонент и создаёт дополнительные перенапряжения и дополнительный ток ЭСР. Порог отказа электронных компонентов при МЗП ЭСР снижается на 50% и более по сравнению с МЗК ЭСР и в наихудшем случае может составить менее 100 В. Для снижения опасности МЗП ЭСР не рекомендуется выполнять медные печатные проводники большой площади, так как при этом увеличивается ёмкость печатной платы, в которой накапливается дополнительный статический заряд.

В приложениях приведены 2 схемы, 3 графика и 2 рисунка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования было выяснено, что соединение электронного компонента с печатной платой снижает порог его отказа при воздействии МЗП ЭСР по сравнению с МЗК ЭСР. При проведении тестирования транзистора при напряжении в 250 В должен произойти отказ транзистора.

Таким образом, моделирование МЗП ЭСР показывает, что массивные медные печатные проводники накапливают дополнительный статический заряд, который при разряде полностью проходит через электронный компонент и создаёт дополнительные перенапряжения и дополнительный ток ЭСР. Порог отказа электронных компонентов при МЗК ЭСР снижается на 50% и бо-

лее, в наихудшем случае может составить менее 100 В. Можно сформулировать рекомендации по разводке печатных плат для условий эксплуатации, неблагоприятных по накоплению электростатических зарядов печатными платами. Для снижения опасности МЗП ЭСР не рекомендуется выполнять массивные медные печатные проводники, если на это нет конструктивного обоснования, так как при этом увеличивается ёмкость печатной платы, в которой накапливается дополнительный статический заряд. Также в обоснованных случаях возможно применение материалов для печатных плат с увеличенной объёмной проводимостью. Такие материалы ПП полностью устраняют возможность заряжения печатной платы и МЗП ЭСР.

Для выявления потенциальной опасности возникновения МЗК ЭСР актуальна разработка метода и аппаратуры для контроля статических потенциалов. Требуется проводить контроль статического потенциала, приобретаемого платами при помощи электрометрической аппаратуры. Поэтому актуально проведение в производственных условиях контроля электростатических потенциалов на операторах и оборудовании. Такой контроль позволит также выявить накопление статического заряда печатными узлами.

По данной причине актуальна разработка оборудования и методик, позволяющих осуществлять контроль электростатических потенциалов непосредственно в условиях цехов приборостроительных предприятий.

Список опубликованных работ

[1.А] Лисовский А.А., Применение электростатических экранов / А.А. Лисовский // IV Международная молодежная научно-практическая конференция «Научные стремления – 2013». – 2013

[2.А] Лисовский А.А., Методы защиты от импульсных помех / А.А. Лисовский // III Молодежная инновационная конференция «Наука и бизнес '13». – 2013.

[3.А] Константинов А.А., Лисовский А.А. Воздействие импульсных помех на стабильность работы микропроцессорных устройств / А.А. Константинов, А.А. Лисовский // III Международная конференция молодых ученых «Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития современного общества». – 2013.

[4.А] Константинов А.А., Лисовский А.А. Защита линий передачи данных от импульсных помех/ А.А. Константинов, А.А. Лисовский // V Международная научная конференция «Интеграция теории и практики мирового научного знания в XXI веке». – 2013.