

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

УДК 621.369.6:537.533.331

На правах рукописи

НИКУЛИН
Алексей Евгеньевич

**МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ К ВОЗДЕЙСТВИЮ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени магистра техники и технологии
по специальности 1-39 81 01 Компьютерные технологии проектирования
электронных систем

Научный руководитель
Алексеев Виктор Федорович
кандидат технических наук,
доцент кафедры ПИКС

Минск 2016

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения 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»

Рецензент:

Таборовец Вячеслав Васильевич,

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий Минского инновационного университета

Защита диссертации состоится «21» января 2016 г. года в 15⁰⁰ 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, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-20-87, e-mail: kafpiks@bsuir.by.

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

ВВЕДЕНИЕ

Электростатические разряды (ЭСР) являются одной из основных причин отказов радиоэлектронной аппаратуры. Заряды возникают в результате различных явлений, приводящих к появлению разностей электрических потенциалов между отдельными элементами оборудования, соприкасающимися с изделиями электронной техники (ИЭТ), между человеком и изделием или оборудованием и т.п. Внезапные разряды приводят к протеканию импульсов токов, как правило, очень коротких, но имеющих большую амплитуду и способных полностью или частично повредить ИЭТ или аппаратуру на них.

Повышение быстродействия, снижение потребляемой мощности, уменьшение геометрических размеров элементов РЭА делают еще более чувствительной к воздействию электрических полей и, в особенности, ЭСР.

Порой, достаточно одного ЭСР, чтобы вывести из строя самый сложный электронный прибор или уничтожить базу данных крупной организации. Экономические потери при этом могут исчисляться сотнями и даже миллионами долларов.

В решение задач, связанных с воздействием ЭСР внесли большой вклад российские ученые и специалисты: Кириллов В.Ю. – в области разработки методов и средств исследований и испытаний воздействия ЭСР на бортовые системы космических аппаратов, Кечиев Л.Н., Горлов М.И., Андреев А.В. – в области экспериментальных исследований воздействия ЭСР на ЭС, Среди зарубежных авторов необходимо отметить работы Джоввета Ч., Бокслейтера В., Хабигера Э. и Шваба А., в которых даны описания отдельных механизмов воздействия и упрощенные аналитические подходы для решения задач связанных с воздействием ЭСР. Однако в этих работах недостаточно полно описаны методы обеспечения стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ЭСР.

Таким образом, вопрос обеспечения стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ЭСР является актуальным.

Выражаю благодарность за оказанную помощь в ходе подготовки диссертационной работы своему научному руководителю, кандидату технических наук, доценту кафедры ПИКС Алексееву Виктору Федоровичу, а также за высококвалифицированные консультации по возникающим вопросам кандидату технических наук, доценту кафедры ПИКС Пискуну Геннадии Адамовичу.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена повышением быстродействия и сложности проектируемых ЭС, возрастанием влияния помех на работоспособность ЭС.

Задача обеспечения стойкости элементов к воздействию ЭСР, а также разработка методов, является актуальной.

Практическая ценность работы заключается в предложенном методе оценки воздействия ЭСР на элементы печатной платы, который может быть использован на этапе разработки ЭС и тем самым, позволяет выявить возможные нежелательные последствия воздействия ЭСР на элементы печатной платы ещё на этапе испытаний. Это позволит снизить затраты и сократить сроки разработки ЭС с учетом требований электромагнитной совместимости при воздействии ЭСР.

Степень разработанности проблемы

Известно, что надежность любого изделия, заложенная при конструировании, обеспечивается технологическим процессом изготовления. Технологические отбраковочные испытания ИЭТ (диодов, транзисторов и интегральных схем), объем которых устанавливается изготовителем в зависимости от вида приемки изделий, их конструктивно-технологических особенностей, технических и экономических возможностей изготовителя, служат для повышения надежности партий изделий путем отделения потенциально ненадежных. Одним из важных факторов, влияющих на надежность интегральных схем (ИС) и полупроводниковых приборов, является воздействие электростатических разрядов

В настоящее время известно, какой вред на ИЭТ приносит электростатический заряд (ЭСЗ). Аккумуляция заряда на пластинах и фотошаблонах приводит к потерям в выходе годных ИЭТ.

По мнению ряда авторов, средние ежедневные потери электронной промышленности США от ЭСЗ составляют от 10 до 18 % продукции. За год затраты, обусловленные потерями от воздействия ЭСЗ на ИЭТ и ремонтом или дополнительным обслуживанием оборудования, составляют в сумме около 10 млрд. долларов.

По мнению исследователей США, воздействие электростатических разрядов вызывает 16—22 % всех отказов у изготовителей ИС; 9—15 % у различных субподрядчиков, 8—14 % у изготовителей радиоэлектронной аппаратуры и 27—33 % у потребителей аппаратуры.

Отбраковочные испытания потенциально ненадежных ИЭТ, в первую очередь электротренировка, занимают много времени, требуют сложное громоздкое стендовое оборудование, больших затрат электроэнергии и площадей для его размещения.

В связи с этим в настоящее время большое распространение получили так называемые альтернативные диагностические методы отбраковки потенциально ненадежных изделий с меньшими экономическими затратами, но не с менее, а зачастую и более эффективными результатами.

Существующие исследования и разработки не в полной мере позволяют учесть все деградационные процессы, которые могут возникнуть в ИЭТ при воздействии ЭСР.

Поэтому изучение влияния ЭСР на ИС позволит оценить стойкость последних и разработать диагностические методы отбраковки потенциально

надежных ИС.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является исследование влияния ЭСР на РЭА и разработка модели для выявления и анализа возможных нежелательных процессов при воздействии ЭСР на функционирование элементов печатных плат электронных систем (ЭС).

Задачи исследования:

1. Провести классификацию электромагнитных помех, оказывающих влияние на элементы печатной платы ЭС.
2. Рассмотреть методы анализа электромагнитной совместимости печатных плат ЭС при воздействии ЭСР.
3. Провести экспериментальные исследования воздействия ЭСР на элементы печатных плат ЭС.

Объектом исследования в данной работе является печатная плата ЭС с установленными элементами.

Предметом работы являются физические процессы, протекающие в элементах ЭС.

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

Теоретической основой исследований являются теоретические и практические положения отечественных и зарубежных исследований ученых по проблеме инновационной деятельности: Алексеев В.Ф., Пискун Г.А., Кириллов В.Ю., Кечиев Л.Н., Файзулаев Б.Н., Логачев В.В., Усанов А.П., Горлов М.И., Андреев А.В., Каверзнев В.А., Грошева Г.Д., Потапов Г.П., Джоввета Ч., Бокслейтера В., Хабигера Э., Шваба А. и др.

Основой исследования являются разработки отечественных и зарубежных авторов в области анализа воздействия ЭСР на элементы платы ЭС.

В магистерской диссертации используются следующие общенаучные методы: эмпирического исследования (эксперимент, измерение, научное исследование), обще логические (анализ, аналогия, системный подход), метод факторного и сравнительного анализа.

Информационная база исследования воздействия ЭСР, создания методов и средств исследований и испытаний воздействия ЭСР сформирована на основе экспериментальных данных, научных публикаций известных зарубежных ученых (Джоввета Ч., Бокслейтера В., Хабигера Э. и Шваба А.) и Республики Беларусь (В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун).

Инструментальной базой является программный продукт ПК-9 – для моделирования эксперимента, *Microsoft Office Excell 2010* – для формирования графиков эксперимента.

Научная новизна и значимость в магистерской диссертационной работы заключается в возможности моделирования воздействия ЭСР на элементы печатной платы в ЭС на основе результатов моделирования испытательного генератора.

Результаты исследований воздействия ЭСР могут использоваться как справочные данные при расчете и конструировании ЭС, а также могут быть представлены на лекциях, как дополнительный материал.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники по дисциплине «Конструирование радиоэлектронных средств».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Классификация отказов ЭС, вызванных воздействием ЭСР на элементы печатных плат, позволяющая выявить наиболее уязвимые при воздействии ЭСР.
2. Компьютерная модель воздействия ЭСР на токоведущие элементы печатной платы.
3. Модель испытательного генератора, позволяющего получить ЭСР, который позволит выработать методы к стойкости ЭС при воздействии ЭСР.

Теоретическая значимость

Установлено влияние ЭСР на элементы печатной платы, что позволило получить новые методы воздействия ЭСР на элементы печатной платы, что позволит еще на этапе разработки ЭС выявлять стойкость элементов печатных плат на воздействие ЭСР.

Получены справочные данные в области разработки радиоэлектронных приборов, которые возможно использовать в качестве обучающего материала.

Практическая значимость

Предложен метод воздействия ЭСР на элементы печатной платы.

Разработана модель испытательного генератора, позволяющего получить ЭСР, который позволит выработать методы к стойкости ЭС при воздействии ЭСР.

Апробация и внедрение результатов исследования

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в шести опубликованных работах и внедрением в учебный процесс.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации 106 страниц, которая включает 13 таблиц и 47 рисунков в основной части диссертации и 10 рисунков в приложении. Список использованных источников состоит из 73 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении и общей характеристике работы** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются общие задачи ЭМС элементов печатных плат ЭС, проводится классификация помех по нескольким критериям, рассматриваются современное состояние основных методов защиты печатных плат от воздействия электромагнитных помех.

Рассмотрены основные меры, которые используются для защиты элементов печатных плат от воздействия электромагнитных помех.

Защита модуля на основе печатной платы включает некоторый арсенал структурно-функциональные, схемотехнические и конструкционные меры. Для отдельных ЭС возможно только применение специальных конструктивных мер повышения защиты. Рассматриваются механизмы возникновения и параметры основного фактора электромагнитных помех. Сформулированы постановка цели и задач диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены особенности и ограничения применения методов и систем анализа ЭМС. Выбрана система анализа для исследования задачи воздействия ЭСР на элементы печатных плат ЭС при простой конфигурации пути тока разряда. Проводится классификация и выявлены наиболее опасные механизмы воздействия ЭСР. В программном комплексе ПА-9 разработаны компьютерные модели (рисунок 1) для анализа воздействия ЭСР на элементы печатных плат ЭС при простой конфигурации пути тока разряда.

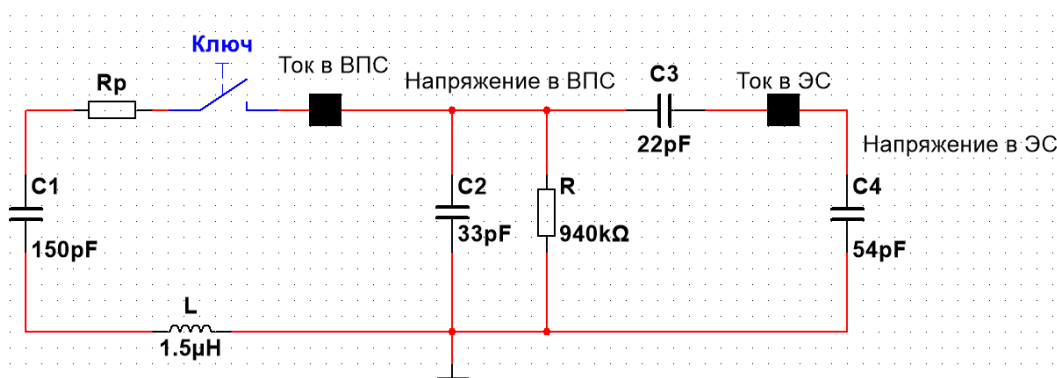


Рисунок 1 – Модель испытательного генератора, реализованная в ПА-9 для моделирования контактного ЭСР [1–А]

На рисунке 2 представлена помеха на исследуемом контуре. Величина воздействующего потенциала ЭСР – 1 кВ. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что результат полученный при моделировании достаточно точно описывает поведение тока ЭСР (погрешность по амплитуде не более $\pm 22\%$). Это объясняется тем, что при данном методе анализа не учитывается часть тока, которая все же распределяется по пластине связи.

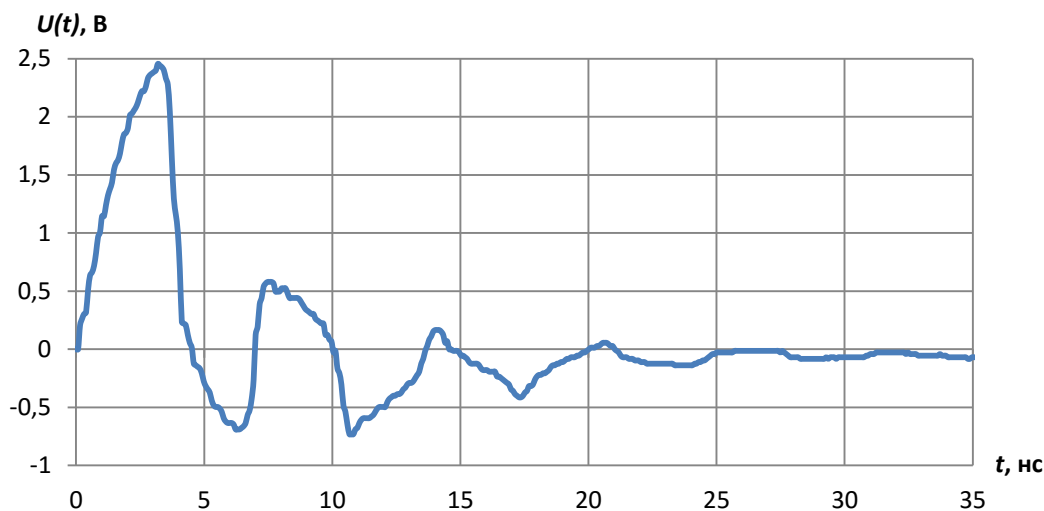


Рисунок 2 – Помеха от воздействия ЭСР на исследуемый контур [1–А]

Проведен анализ тока ЭСР и разряда с параметрами, установленными ГОСТ Р 51317.4.2-99. Исследовано поведение тока при воздействии ЭСР на пластину связи. Результаты показывают сильное искажение формы тока в результате многократного отражения.

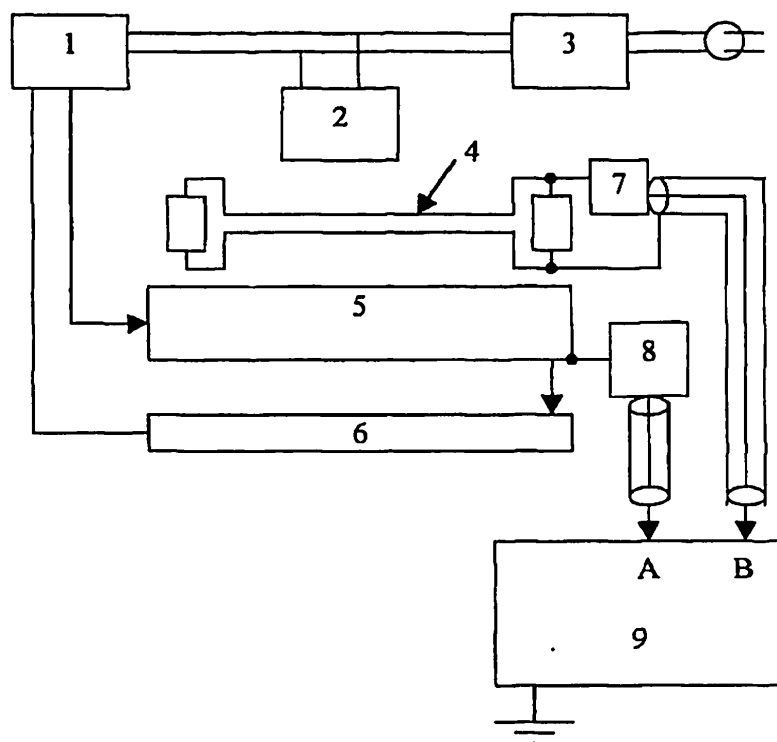
Исследована зависимость величины помехи ($U_{пом}$), при воздействии ЭСР на пластину связи, от длины (l) межсоединения в печатной плате.

Получены формы и величины помех при простой конфигурации пути тока ЭСР с применением моделей на основе теории цепей. Адекватность данных моделей доказывается сравнением с экспериментальными данными (погрешность не более $\pm 22\%$).

Разработаны модели и проведено моделирование воздействия ЭСР на элементы печатных плат при произвольной конфигурации пути тока разряда на основе метода моментов.

В третьей главе приведено описание и структурная схема экспериментального стенда (рисунок 3).

Для проведения эксперимента, по измерению электромагнитных помех при воздействии ЭСР, использовался специально разработанный экспериментальный стенд, который включает необходимые измерительные приборы, пластину связи и специальный исследуемый контур на котором измеряется электромагнитная помеха.



- 1 – Генератор-имитатор ЭСР с неизменным передним фронтом воздействия;
 2 – Цифровой вольтметр для контроля величины воздействующего напряжения ЭСР;
 3 – Источник высоковольтного постоянного напряжения; 4 – Исследуемый контур;
 5 – Вертикальная пластина связи; 6 – Горизонтальная пластина связи;
 7 – Активный пробник; 8 – Делитель напряжения 1:100;
 9 – Стробоскопический осциллограф С7-8

Рисунок 3 - Структурная схема экспериментального стенда

Анализ результатов показанных на рисунке 4, содержащихся в данной главе показывает, что в эксперименте зафиксированы довольно значительные по амплитуде (420 мВ) и быстротечные по времени (10 нс) электромагнитные помехи при воздействии ЭСР.

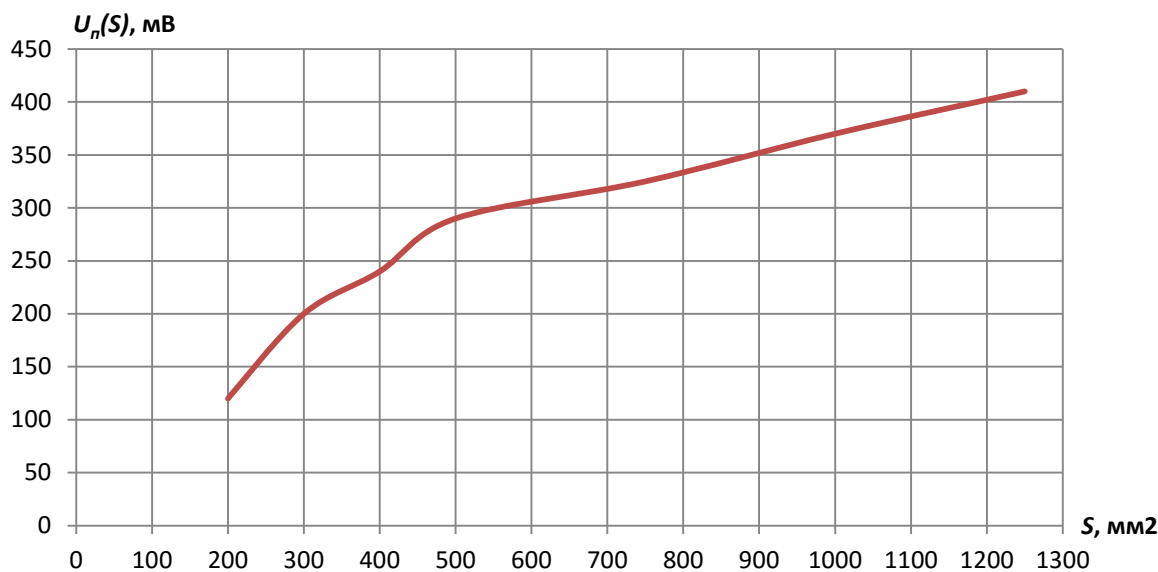


Рисунок 4 - Величина электромагнитной помехи при напряжении воздействия 750 В

Хотя в эксперименте преднамеренно создавались условия повышающие уровни электромагнитных помех, необходимо учитывать, что при реальных испытаниях требования установленные ГОСТ Р 51317.4.2-99 намного жестче по сравнению с проведенным экспериментом по величине напряжения воздействия (при рекомендуемом контактном разряде - до 8 кВ) и фронту нарастания тока ЭСР (не более 0,7...1 нс). Поэтому проведенные экспериментальные исследования подтверждают необходимость выявления критических ситуаций по электромагнитным помехам при воздействии ЭСР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан метод воздействия ЭСР на функционирование элементов печатных плат, который позволяет выявить стойкость разрабатываемых ЭС к воздействию электростатических разрядов.

2. Обоснован выбор методов и систем для анализа воздействия ЭСР на элементы печатных плат.

3. Разработана модель, и проведено моделирование воздействия ЭСР на элементы печатных плат при простой конфигурации пути тока разряда. Погрешность моделирования $\pm 22\%$.

4. Проведены экспериментальные исследования воздействия ЭСР, которые подтвердили адекватность разработанных методов и моделей для выявления стойкости ЭС к воздействию ЭСР.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1-А] Никулин, А.Е. Схемотехническое моделирование воздействия электростатического разряда на проводники печатной платы / А.Е. Никулин // VIII Международная научно-практическая конференция, 2016 г., секция «Технические науки», Томск, – 2016. *В печати.*

[2-А] Никулин, А.Е. Влияние электростатических разрядов на интегральные микросхемы / А.Е. Никулин // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2015 – С. 245–246.

[3-А] Альхимович, А.И. Обоснование выбора токоведущих элементов микросхем памяти для анализа тепловой нестационарности в результате воздействия разрядов статического электричества / А.И. Альхимович, А.Е. Никулин // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2015 г., секция «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, – 2015 – С. 130–132.

[4-А] Альхимович, А.И. Анализ теплового режима радиоэлементов, работающих при импульсных электрических нагрузках / А.И. Альхимович, А.Е. Никулин // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и сту-

дентов БГУИР, 2015 г., секция «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, – 2015 – С. 133–134.

[5–А] Альхимович, А.И. Исследование тепловой нестационарности во внутренних выводах интегральных схем при воздействии разряда статического электричества / А.И. Альхимович, А.Е. Никулин // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2015 г., секция «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, – 2015 – С. 135–137.

[6–А] Альхимович, А.И. Влияние статического электричества на параметры и характеристики интегральных схем / А.И. Альхимович, А.Е. Никулин // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2015 г., секция «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, – 2015 – С. 138.

РЕЗЮМЕ

Никулин Алексей Евгеньевич

Методы обеспечения стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию электростатических разрядов

Ключевые слова: электростатический разряд, моделирование, печатная плата.

Цель работы: разработка метода обеспечения стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ЭСР, а также разработка модели для выявления и анализа возможных нежелательных процессов при воздействии ЭСР на функционирование элементов печатных плат ЭС.

Полученные результаты и их новизна: в диссертационной работе установлено влияние ЭСР на элементы печатной платы, что позволило получить новые методы воздействия ЭСР на элементы печатной платы, а также на этапе разработки ЭС выявлять стойкость элементов печатных плат на воздействие ЭСР. Получены справочные данные в области разработки радиоэлектронных приборов, которые возможно использовать в качестве обучающего материала. На основе моделирования был выбран механизм воздействия ЭСР на элементы печатной платы. Проведены экспериментальные исследования воздействия ЭСР, которые подтвердили адекватность разработанных методов и моделей, что позволит выявлять стойкость радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ЭСР.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс.

Область применения: производство интегральных микросхем.

SUMMARY

Nikulin Aliaksey

Methods of ensuring durability of electronic equipment to the effects of electrostatic discharge

Keywords: electrostatic discharge , modeling, circuit board.

The object of study: develop a method for providing resistance to the effects of electronic equipment ESD, as well as the development of a model to identify and analyze the possible adverse effects of ESD processes in the functioning of the elements of electronic printed circuit boards.

The results and novelty: The thesis The effect of ESD on the elements of the circuit board, which allowed us to obtain new methods of exposure to the elements ESD circuit board, as well as the stage of development of electronic means to detect resistance elements of printed circuit boards to the impact of ESD. Reference data obtained in the development of electronic devices, which may be used as a teaching material. On the basis of modeling the mechanism of action has been selected on the elements of ESD PCB. Experimental study of the effects of ESR, which confirmed the adequacy of the developed methods and models, which will identify key-resistance of electronic equipment to the effects of ESD.

Degree of use: results are implemented in the educational process.

Sphere of application: production of integrated circuits.

РЭЗІЮМЭ

Нікулін Аляксей Яўгенавіч

Метады забеспячэння стойкасці радыёэлектроннай апаратуры да ўздзеяння электростатычных разрадаў

Ключавыя словы: электростатычны разрад, мадэляванне, друкаваная плата.

Мэта працы: распрацоўка метаду забеспячэння стойкасці радиоэлектронную апаратуры да ўздзеяння ЭСР, а таксама распрацоўка мадэлі для выяўлення і аналізу магчымых непажаданых працэсаў пры ўздзеянні ЭСР на функцыянаванне элементаў друкаваных поплаткаў ЭС.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: у дысертацыйнай рабоце ўстаноўлена ўплыў ЭСР на элементы друкаванай платы, што дазволіла атрымаць новыя метады ўздзеяння ЭСР на элементы друкаванай платы, а таксама на этапе распрацоўкі ЭС выяўляць стойкасць элементаў друкаваных поплаткаў на ўздзеянне ЭСР. Атрыманы даведачныя дадзеныя ў галіне распрацоўкі радыёэлектронных прыбораў, якія магчыма выкарыстоўваць у якасці навучальнага матэрыялу. На аснове мадэлявання быў абраны механізм ўздзеяння ЭСР на элементы друкаванай платы. Праведзены эксперыментальныя даследаванні ўздзеяння ЭСР, якія пацвердзілі адэкватнасць распрацаваных метадаў і мадэляў, што дазволіць выяўляць стойкасць радыёэлектроннай апаратуры да ўздзеяння ЭСР.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс.

Вобласць прымянення: вытворчасць інтэгральных мікрасхем.

