

УДК 656.25 (043.3)

Комнатный Дмитрий Викторович

**МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ НА
УСТОЙЧИВОСТЬ К
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ РАЗРЯДАМ**

05.22.08 Управление процессами перевозок

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Гомель 2004

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный университет транспорта».

Научный руководитель: **Бочков Константин Афанасьевич**,
доктор технических наук, профессор,
проректор по учебной работе
Белорусского государственного
университета транспорта

Официальные оппоненты: **Шелухин Виктор Иванович**,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Автоматика и телемеханика на
железнодорожном транспорте»
Московского государственного
университета путей сообщения

Коврига Анатолий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Автоматика и
телемеханика» Белорусского
государственного университета
транспорта

Оппонирующая организация: **Конструкторско-технологический
центр Белорусской железной дороги.**

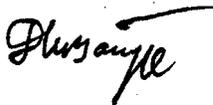
Защита состоится «27» февраля 2004 г. в 14-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.27.01 в Учреждении образования «Белорусский государственный университет транспорта» по адресу 246017, г. Гомель, ул. Кирова 34, ауд. 248. Тел (8-0232)-95-29-41.

С диссертацией можно ознакомиться в научно технической библиотеке Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Автореферат разослан «23» января 2004 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью просим направлять в адрес совета университета.

Ученый секретарь
совета



Р. К. Гизатуллин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Решение проблемы электромагнитной совместимости современных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) во многом определяет надежность и безопасность их функционирования. Безопасность микроэлектронных СЖАТ должна обеспечиваться комплексом мероприятий, направленных на обеспечение и подтверждение установленных в нормативной документации требований безопасности. В число этих мероприятий входят доказательство безопасности и сертификация СЖАТ. В нормативной документации определены следующие методы доказательства безопасности: экспертный, имитационное моделирование, стендовые испытания и опытная эксплуатация. В частности, производятся стендовые испытания устройства СЖАТ на электромагнитную совместимость, согласно действующим стандартам. Сертификация представляет собой набор мероприятий, направленных на обеспечение уверенности в том, что должным образом идентифицированная продукция соответствует конкретному стандарту или другому нормативному документу. В настоящее время действует обширная номенклатура нормативно-технической документации, определяющая требования на характеристики электромагнитной совместимости (ЭМС) продукции и на методы их контроля.

В Республике Беларусь с первого января 1999 года введен в действие руководящий документ РД РБ БЧ 19.055-99 «Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Общие положения, порядок и методы испытания на безопасность», разработанный совместно Белорусским государственным университетом транспорта и Белорусской железной дорогой. Им устанавливается, что испытания на безопасность являются обязательным этапом в разработке, серийном производстве и эксплуатации изделий железнодорожной автоматики. В число испытаний входит и проверка на устойчивость и безопасность функционирования при воздействии электромагнитных помех. Установлены следующие испытательные воздействия:

- наносекундные импульсные помехи, действующие в сети электропитания, заземления и ввода-вывода, согласно СТБ ГОСТ Р 51317.4.4-2001;
- микросекундные импульсы помех большой энергии в цепях электропитания, согласно СТБ ГОСТ Р 51317.4.5-2001;
- динамические изменения напряжения в сети электропитания, по СТБ ГОСТ 51317.4.11-2001;
- электростатические разряды (ЭСР), по СТБ ГОСТ Р 51317.4.2-2001.

В Российской Федерации действует ГОСТ Р 50656-2001, согласно которому технические средства (ТС) ЖАТ должны соответствовать требованиям устойчивости к указанным выше видам электромагнитных помех. Этот ГОСТ устанавливает, что испытания микроэлектронных

устройств ЖАТ на устойчивость к электростатическому разряду производятся по СТБ ГОСТ Р 51317.4.2-2001.

СТБ ГОСТ Р 51317.4.2-2001 и аналогичным международным стандартом МЭК 61000-4-2 установлены два этапа процедуры проведения испытаний микроэлектронного оборудования. Сначала путем испытательных воздействий выбираются точки, в которых чувствительность испытуемого средства наибольшая. Затем производится вторая серия разрядов в каждой из этих точек с целью выявить нарушения функционирования испытуемого устройства. Такая процедура приводит к увеличению затрат времени на испытания технических средств ЖАТ. Как отмечается в научной литературе, испытания на устойчивость к ЭСР оказываются одними из самых продолжительных. Кроме того, процедура испытаний является чисто эмпирической. При этом отсутствует возможность составить представление о воздействии помех ЭСР на микроэлектронное устройство до проведения испытаний. На обоих этапах последовательность приложения испытательных воздействий в точках не регламентирована. Это может привести к тому, что наиболее чувствительные узлы ТС могут быть пропущены или выявлены в конце всей процедуры испытаний. Адекватность результатов испытаний в таких обстоятельствах во многом зависит от субъективных факторов. При этом вероятность ошибки человека составляет 10^{-2} , в то же время допустимая вероятность сбоя от опасных отказов микроэлектронных СЖАТ составляет 10^{-8} – 10^{-12} . Все это позволяет заключить, что испытания согласно существующим нормативным документам не исключают возможности пропуска точки, электростатический разряд в которую может привести к сбою микроэлектронного устройства ЖАТ при его эксплуатации. Аппаратура микроэлектронной СЖАТ в этом случае может перейти в состояние опасного отказа, что повлечет за собой недопустимое снижение уровня безопасности движения поездов. Следовательно, необходимо более строгое решение проблемы электромагнитной совместимости микроэлектронных СЖАТ и, в частности, разработка более адекватных реальным условиям методов испытаний устройств ЖАТ на устойчивость к ЭСР. Одним из результативных способов решения этой задачи является применение методов моделирования.

Разработке методов решения проблемы безопасности и ЭМС систем ЖАТ посвящены работы *Н. М. Беляева, П. Ф. Бестемьянова, К. А. Бочкова, М. Н. Василенко, Д. В. Гавзова, Г. И. Загария, В. Н. Иванченко, А. М. Костроминова, А. А. Красногорова, В. Ф. Кустова, В. М. Лисенкова, Н. К. Модина, В. В. и Вл. В Сапожниковых, Д. В. Шаягина, И. Б. Шубинского*. Отдельным вопросам разработки математических моделей воздействия ЭСР на рецепторы помех посвящены работы многих авторов, в частности: *В. Ю. Кириллова, Л. Н. Кечиева, И. С. Гурвича, В. Бирна, М. Разеви и Д. Ло-Ветри; В. Сандеррея, Д. Карри и Р. Ларсона; Б. Брауна и С. Рауса; М. Ма и А. Ондрейко; О. Фуджисвары, С. Грациано, Р. Де Лео, Р. де Рентиса и В. М. Примати; Б. Джанетти и Б. Теллини* и многих других. Однако, несмотря на обилие публикаций, в которых рассмотрено решение многих частных

задач, еще не выработан единый подход к моделированию влияния ЭСР. Во многих работах недостаточно внимания уделяется анализу устойчивости к ЭСР реальных ТС и определению количественных характеристик их устойчивости. В работах, изданных в СССР и СНГ, вопросы, связанные с электростатическим разрядом, освещены недостаточно, особенно по отношению к устройствам СЖАТ.

Поэтому актуальными являются исследования, направленные на разработку моделей воздействия ЭСР на микроэлектронные средства и системы ЖАТ и применение этих моделей как для выбора конструктивных решений на этапе проектирования, так и для сокращения времени испытаний микроэлектронного оборудования СЖАТ.

Связь работы с научными программами, темами. Работа выполнена в рамках программы научно-исследовательских и опытно конструкторских работ № ГР 19962670 «Методы комплексного решения проблемы электромагнитной совместимости микроэлектронных систем управления ответственными технологическими процессами» и № ГР 1999827 «Теоретическое обоснование разработки норм на параметры ЭМС. Вероятностный подход».

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является разработка и экспериментальная проверка методов, алгоритмов и программ для исследования воздействия электростатического разряда на технические средства, приборы и устройства, позволяющих расчетным путем анализировать устойчивость микроэлектронных СЖАТ к электростатическому разряду, а также выбирать точки воздействий при натурных испытаниях микроэлектронных СЖАТ. В соответствии с указанной целью в работе поставлены и решены следующие задачи:

- построение математической модели воздействия ЭСР на рецепторы помех в микроэлектронных СЖАТ;
- создание модели помехоустойчивости технических средств СЖАТ;
- разработка методов расчета влияния электростатического разряда на микроэлектронные узлы устройств СЖАТ;
- разработка метода определения количественных характеристик статических и квазистатических электрических полей;
- разработка метода отыскания точек испытательных воздействий на устройства СЖАТ.

Объект и предмет исследования. В качестве объекта исследования выступают устройства микроэлектронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики, выполняющие функции управления движением поездов и обеспечения безопасности перевозочного процесса. Предметом исследования является разработка математических моделей воздействия ЭСР на узлы СЖАТ, моделей помехоустойчивости СЖАТ, методов расчета помех в узлах СЖАТ, позволяющих определять устойчивость СЖАТ к электростатическому разряду на этапе проектно-конструкторских разработок, методов выбора мест приложения тестовых разрядов и последовательности испытаний.

Методология и методы проведенного исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории электромагнитного поля, теоретической электротехники, теории надежности, электромагнитной совместимости, математической физики, вычислительной математики и линейной алгебры. Методология исследования базируется на вероятностном и системном подходах к построению математических моделей влияния помех на рецепторы и методе граничных элементов решения задач математической физики.

Научная новизна и значимость полученных результатов заключается в следующем:

- разработана обобщенная модель устойчивости СЖАТ к воздействию ЭСР, которая отличается от известных моделей применением системного подхода, учетом вероятностного характера помехоустойчивости, использованием энергетического критерия для определения степени устойчивости к ЭСР;
- предложен способ определения граничных условий для расчета электрического поля ЭСР внутри корпуса устройства ЖАТ;
- показана возможность замены системы линий связи узлов рецептора помех эквивалентной линией и вычисления наводок на нее методом средних потенциалов;
- создан метод расчета характеристик статических и квазистатических электрических полей, основанный на последовательном решении численными методами интегральных уравнений электростатического поля, следующих из граничных условий электростатики, что позволяет получить приемлемую точность и хорошую сходимость;
- предложен метод выбора последовательности точек испытательных воздействий при проведении испытаний на устойчивость к ЭСР на основе результатов расчета воздействия ЭСР на аппаратуру ЖАТ.

Практическая значимость полученных результатов. Разработанные в диссертации модели и методы позволяют: осуществить предварительную оценку устойчивости микроэлектронных СЖАТ к ЭСР на этапе проектно-конструкторских работ, предложить способы повышения устойчивости к ЭСР, осуществить выбор точек испытательных воздействий при лабораторных испытаниях на устойчивость к ЭСР и, таким образом, сократить время на разработку, испытание и сертификацию новых микроэлектронных СЖАТ, одновременно снизив затраты средств на проведение испытаний.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы при испытаниях на помехоустойчивость и электромагнитную совместимость системы диспетчерской централизации «Неман».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Использование разработанной математической модели воздействия ЭСР на микроэлектронные устройства ЖАТ, учитывающей вероятностный характер уровня помех и уровня

помехозащищенности ТС ЖАТ позволяет прогнозировать результаты испытаний устройств ЖАТ на устойчивость к ЭСР.

2. Численное решение интегральных уравнений электростатика последовательно, когда результаты решения первого уравнения служат начальным приближением для решения второго, позволяет вычислять наводки на шины узлов микроэлектронной аппаратуры ЖАТ с хорошей сходимостью и высокой точностью.
3. Многопроводные линии связи печатных плат микроэлектронной техники могут быть заменены эквивалентной однопроводной линией, наводки на которую рассчитываются методом средних потенциалов.
4. Результаты моделирования воздействия ЭСР на устройства ЖАТ позволяют выделить наиболее чувствительные узлы, выбрать местоположение точек испытательных воздействий на корпусе ТС и установить порядок приложения разрядов к этим точкам.

Личный вклад соискателя. Разработка модели устойчивости микроэлектронных СЖАТ к ЭСР на основе системного подхода, создание метода поиска точек испытательных воздействий, расчет переходных процессов в схеме замещения системы индуктор-рецептор, построение расчетной модели испытуемого устройства, разработка алгоритмов и программно-математического обеспечения для расчета статических полей были выполнены лично соискателем. Основные направления исследований сформулированы научным руководителем д. т. н., профессором Бочковым К. А. Под его руководством разработана и методика проведения испытаний адаптера связи ДЦ «Неман».

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на:

- Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития транспортных систем. 1-2 октября 1999 г. Гомель, БелГУТ.
- Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» 18-20 октября 2000 г. Гомель, БелГУТ.
- Научно-технической конференции молодых специалистов РУП «ПО Белоруснефть» 26 ноября 1999 г. Речица, РУП «ПО Белоруснефть»
- Международном семинаре «Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость» 19-21 сентября 2001 г. Гомель, БелГУТ.
- Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса» 25-26 октября 2001 г. Гомель, БелГУТ.
- Научно-технической конференции молодых специалистов РУП «ПО Белоруснефть» 25 мая 2001 г. Речица, РУП «ПО Белоруснефть»
- Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» 24-25 октября 2002 г. Гомель, БелГУТ

- Научно-практической конференции молодых специалистов РУП «ПО Белоруснефть» 16 ноября 2002 г. г. Речица РУП «ПО Белоруснефть»
- Втором международном семинаре «Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость» 12-13 июня 2003 г., Гомель, БелГУТ

Результаты также докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Автоматика и телемеханика» Белорусского государственного университета транспорта и на семинарах аспирантов и соискателей этой кафедры в 1999 – 2002 годах.

Опубликованность результатов. По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ. Из них: 4 доклада, 4 статьи, 6 тезисов докладов. Общее количество опубликованных материалов 46 – страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, списка литературы, включающего 116 наименований, и приложений. Работа содержит 167 страниц основного текста, 30 рисунков, 5 таблиц, 8 приложений на 24 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показано значение проблемы ЭМС микроэлектронных систем обеспечения безопасности функционирования транспортного комплекса и осуществлен выбор темы исследования в рамках указанной проблематики.

В общей характеристике работы обоснована актуальность темы, ее связь с научно-исследовательскими работами, сформулированы цель и задачи исследования. Представлена научная новизна, практическая значимость полученных результатов и перечислены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ опубликованных работ, посвященных проблеме математического моделирования электростатического разряда и его воздействия на микроэлектронную технику.

Анализ публикаций по проблеме моделирования воздействия электростатического разряда на электронные устройства и приборы выявил некоторые проблемы, затрудняющие применение моделей ЭСР в инженерной практике.

Проведение испытаний ТС СЖАТ без предварительной оценки результата испытаний расчетным путем предполагает большие затраты времени на разработку.

Во многих работах рассматриваются значительно упрощенные по сравнению с реальными устройствами СЖАТ модели рецепторов и источников электростатического разряда.

Методы расчета характеристик полей ЭСР, по данным литературных источников, имеют, в основном, теоретический характер и слабо связаны с инженерной практикой.

Важная проблема оптимизации выбора точек испытательных воздействий остается не разработанной, хотя решение этой проблемы позволило бы существенно сократить продолжительность испытаний.

На основании анализа существующих разработок в данной главе сформулирована основная цель настоящей работы, которая заключается в разработке моделей воздействия ЭСР на технические средства СЖАТ, позволяющих при допустимой сложности математического аппарата добиться приемлемого для инженерной практики представления об изучаемом явлении.

Достижение поставленной цели требует решения следующих основных задач:

- разработать модель устойчивости устройств СЖАТ к ЭСР на основе вероятностного подхода, который имеет ряд существенных преимуществ перед детерминированным. Выбрать критерии устойчивости устройств СЖАТ к ЭСР;
- исследовать возможность применения приближенного описания электромагнитного поля ЭСР, а также выработать допустимые упрощения при моделировании структуры ТС СЖАТ;
- выбрать наиболее значимые параметры, описывающие электромагнитные помехи в узлах устройств СЖАТ, и разработать методы расчета этих параметров в зависимости от характеристик источника ЭСР;
- с помощью предлагаемых моделей разработать методы оптимизации лабораторных испытаний микросистемных СЖАТ на устойчивость к ЭСР по критерию сокращения затрат времени;
- экспериментально подтвердить адекватность предлагаемых моделей путем анализа устойчивости к ЭСР выбранного устройства железнодорожной автоматики.

Во второй главе разработана вероятностно-статистическая модель воздействия ЭСР на микросистемные устройства ЖАТ.

В вероятностно-статистических моделях уровни помех на входах рецепторов и уровень помехоустойчивости рецепторов рассматриваются как случайные величины со своими законами распределения. Количественно уровень ЭМС для такой модели оценивается величиной вероятности сбоя рецептора в реальной электромагнитной обстановке. Величина вероятности сбоя характеризует также эффективность и безопасность функционирования системы ЖАТ. В качестве одного из параметров, описывающих электромагнитные помехи от ЭСР на входах рецепторов, целесообразно рассматривать энергию помех, рассеиваемую во входных цепях рецепторов. Это объясняется тем, что сбой рецептора наступает с вероятностью, равной единице, когда энергия помех превышает некоторый уровень.

$$\left. \begin{aligned} P_{сб}(W < W_{нор}) &= 0 \\ P_{сб}(W \geq W_{нор}) &= 1 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $P_{сб}$ – вероятность сбоя рецептора;

W – энергия помехи, Дж;

$W_{пор}$ – пороговая энергия сбоя данного рецептора, Дж.

Если известен закон распределения энергии помех, создаваемых ЭСР на входных цепях рецепторов, то вероятность сбоя рецептора определяется через плотность вероятности распределения уровней энергии $p(W)$ следующим образом (рисунок 1)

$$P_{сб} = \int_{W_{пор}}^{\infty} p(W) dW. \quad (2)$$

Условие помехоустойчивости рецептора имеет вид

$$P_{сб} \leq P_{зад}, \quad (3)$$

где $P_{зад}$ – нормированное значение вероятности сбоя.

Для реализации такого подхода следует произвести регистрацию и анализ энергии помех во входных цепях рецептора для последующего

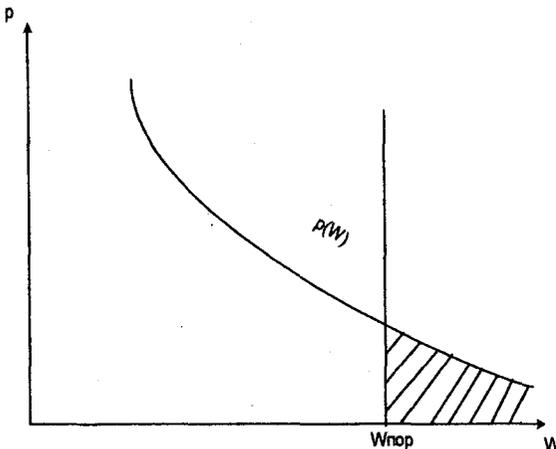


Рисунок 1 – Вероятностная модель помехоустойчивости устройств СЖАТ

определения вида закона распределения и его параметров. Однако измерение энергии помех непосредственно внутри аппаратуры СЖАТ затруднительно. Зато хорошо разработаны методы измерения напряжения на источниках ЭСР перед разрядом. Переход от распределения уровней напряжения на источнике ЭСР к энергии, рассеиваемой во входных цепях рецепторов, возможно осуществить расчетным путем. При этом

возникает необходимость проведения неоднократных расчетов энергии в зависимости от значений напряжений на источнике, входящих в гистограмму распределения. Это может повлечь за собой неоправданно большие затраты времени на исследование устойчивости конкретного устройства СЖАТ.

Чтобы сократить затраты времени при моделировании следует учитывать, что протекание процесса ЭСР зависит от многих факторов:

напряжения на источнике, размеров источника и рецептора и других. Используя принцип наихудших условий, можно перейти от многомерных функций распределения к сечениям по наиболее неблагоприятным параметрам. При этом рассматриваются одномерные функции распределения помех при фиксированном значении других параметров (для наихудших условий). На практике источником электростатического разряда является человек-оператор. Величина начального напряжения на источнике ЭСР при фиксированных значениях других параметров зависит от множества факторов, среди которых климатические условия, характер процесса трибоэлектризации, размеры источника. Эти факторы изменяются случайным образом и каждый из них вносит свой вклад в закон распределения напряжения. Для случайной величины, зависящей от множества факторов, справедливо предположение о нормальном законе ее распределения на основании центральной предельной теоремы. В реальных условиях эксплуатации устройств ЖАТ величины напряжения на источнике ЭСР всегда ограничены предельными значениями сверху и снизу. Поэтому распределение начального напряжения следует описывать усеченным нормальным законом с математическим ожиданием U_{μ} . Анализ литературных источников позволяет заключить, что в определенных пределах изменения климатических условий закон распределения будет характеризоваться очень большим эксцессом. Это означает, что отклонения величины напряжения на источнике ЭСР от математического ожидания имеют малую вероятность.

Таким образом оценивать устойчивость ТС ЖАТ к ЭСР следует путем оценки энергии помех, возникающих при максимально возможном напряжении на источнике разряда. Критерием устойчивости рецептора в этом случае будет соотношение

$$W_{\text{расч}} < W_{\text{пор}}, \quad (4)$$

где $W_{\text{расч}}$ – рассчитанный уровень помех в цепях рецептора, Дж.

Практическое применение критерия (4) по сравнению с (3) требует меньших затрат времени на расчеты.

Критерии (3) и (4) позволяют количественно охарактеризовать устойчивость устройств ЖАТ к ЭСР с учетом, как характеристик устройства, так и свойств процесса электростатического разряда. Их применение при конструкторских разработках и испытаниях требует разработки методов расчета величин, описывающих электромагнитные помехи от ЭСР в узлах устройств ЖАТ.

Для количественного исследования электромагнитных помех в общем случае требуется проведение расчетов изменяющегося во времени электромагнитного поля. Такие расчеты весьма сложны, равно как и реализация их на ЭВМ. Известно, что на расстояниях, меньших длины волны, для анализа электромагнитного поля допустимо применять квазистатическое приближение. При этом электрические поля определяются зарядами, а магнитные – токами индуктора. Электростатический разряд характеризуется высоким начальным напряжением и малым током, поэтому

в ближней зоне электромагнитное поле ЭСР имеет преобладающую электрическую составляющую. Для определения чувствительности рецепторов помех достаточно определить характеристики помехонесущего поля в тот момент времени, когда напряжение или ток на корпусе максимальны, так как при этом возникают наибольшие помехи.

Расчеты параметров помех, созданных ЭСР в устройствах СЖАТ, требуют определения величин, характеризующих электрическое поле внутри корпуса устройства. Методы расчета этих величин входят, как органическая часть, в модель воздействия ЭСР на устройства СЖАТ. Модель влияния электростатического разряда на чувствительные узлы микроэлектронного оборудования и приборов целесообразно построить на основе методики анализа электромагнитной обстановки при воздействии помех, предложенной А. Орланди, С. Мазетти, З. Флисовским и М. Ярмаркиным.

Указанная методика предполагает построение функции преобразования напряжения или тока на индукторе помех в напряжения или токи в узлах рецептора помех. В случае прямого электростатического разряда следует по напряжению, возникающему на корпусе устройства ЖАТ, определить напряжение на проводниках, электрически эквивалентных шинам печатных плат узлов ТС ЖАТ. Импульс напряжения, наведенный на линиях связи шин, рассеивается во входных цепях узлов ТС ЖАТ. От величины рассеянной энергии в свою очередь зависит, произойдет ли отказ или сбой рассматриваемого устройства. При расчетах наводок на шины печатных плат целесообразно вначале отыскивать распределение заряда по корпусу рецептора помех, а также на перегородках и экранах внутри корпуса. Затем, зная распределение заряда, наведенное напряжение легко отыскать с помощью квадратур.

Тогда процедуру расчета величины напряжения, наведенного в модели узлов рецептора можно записать в операторной форме:

$$\begin{aligned} B(\alpha, u_n) &= \sigma \\ S(\alpha_1, \sigma) &= u_p, \end{aligned} \quad (5)$$

где B – оператор, с помощью которого вычисляется распределение заряда по корпусу технического средства;

α, α_1 – геометрические характеристики задачи;

σ – распределение заряда на корпусе технического средства, Кл/м²;

u_n – напряжение на корпусе, В;

S – оператор, с помощью которого вычисляется напряжение помехи в узлах рецептора;

u_p – напряжение помех в узлах рецептора, В.

Конкретный вид операторов B и S определяется выбранным методом расчета характеристик электростатического поля.

В результате расчетов в соответствии с (5) отыскивается наведенное в узлах рецептора напряжение. В моделях помехоустойчивости, предложенных во второй главе, основным параметром, характеризующим электромагнитные помехи от ЭСР на входах рецепторов, является энергия помех. При вычислениях характеристик помех, вызванных воздействием

наносекундных импульсов поля на паразитные антенны, применяется волновой подход. Для снижения уровня помех при передаче данных линии связи печатных плат, как правило, согласовываются с нагрузкой. Тогда в рамках волнового подхода можно показать, что форма импульса в линии связи, нагруженной на чисто омическое сопротивление, повторяет форму импульса помехи. Форма импульса электростатического разряда известна, следовательно, можно считать, что ту же форму будет иметь импульс, индуцированный в узлах рецептора напряжения. Зная форму и амплитуду импульса помех, можно вычислить энергию помехи, рассеиваемой на омическом сопротивлении.

Для сокращения времени испытаний предлагается производить выбор точек испытательных воздействий на прибор или устройство, используя результаты математического моделирования его устойчивости к электростатическому разряду.

Для определения точек испытательных воздействий составляется множество $\{W_i\}$ энергий, рассеиваемых во входных цепях узлов ТС СЖАТ. Это множество упорядочивается по убыванию. После чего точки испытательных воздействий располагают на болтах, решетках, отверстиях, металлических частях корпуса, находящихся вблизи узлов рецептора. Начинают испытания с точек, расположенных у узла, в котором рассеивается максимальная энергия, и продолжают в порядке следования номеров во множестве энергии пока не встретится узел, энергия помех в котором меньше пороговой энергии сбоя для элементной базы рецептора.

Такая методика позволяет выделить наиболее чувствительные узлы с учетом, как электромагнитной обстановки, так и конструктивных особенностей ТС. Эти узлы подвергаются испытательному воздействию в первую очередь, так как именно эти составные части конструкции являются «слабым звеном» технического средства и, в конечном счете, ограничивают его устойчивость к ЭСР. При этом достигается экономия времени испытаний.

Третья глава посвящена разработке численного метода расчета электрического поля в корпусах ТС СЖАТ при воздействии на них электростатического разряда.

Как отмечалось выше, наиболее просто определить наводимое в узлах технического средства напряжение, зная распределение заряда по граничным поверхностям задачи. Это распределение с наименьшими затратами времени можно отыскать методом граничных элементов.

Метод граничных элементов заключается в численном решении системы интегральных уравнений для неизвестного распределения поверхностной плотности электрического заряда на граничных поверхностях задачи. Первое уравнение системы выражает зависимость потенциала граничной поверхности от распределения поверхностной плотности заряда и имеет вид:

$$\varphi(Q) = \sum_{k=1}^K \int_{S_k} \frac{\sigma(M)}{4\pi\epsilon_a r_{QM}} dS, \quad (6)$$

где $\varphi(Q)$ – потенциал в точке наблюдения Q , принадлежащей граничной поверхности, В;

K – число граничных поверхностей задачи;

S_k – площадь k – той граничной поверхности, м²;

$\sigma(M)$ – поверхностная плотность заряда в точке влияния M , лежащей на граничной поверхности S_k , Кл/м²;

ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м;

r_{QM} – расстояние между точкой влияния и точкой наблюдения, м.

Второе уравнение связывает значения величин поверхностной плотности заряда и нормальной составляющей вектора электростатической индукции в данной точке граничной поверхности. Оно имеет следующий вид:

$$-2\pi\sigma(Q) = \sum_{k=1}^K \int_{S_k} \frac{\sigma(M) \cos(\vec{r}_{QM}; \vec{n}_Q)}{r_{QM}^2} dS, \quad (7)$$

где $\sigma(Q)$ – поверхностная плотность заряда в точке наблюдения, Кл/м²;

n_Q – нормаль к граничной поверхности в точке наблюдения.

Для численного решения интегральных уравнений каждая граничная поверхность S_k разбиваются на N участков, называемых граничными элементами. В пределах каждого граничного элемента поверхностная плотность заряда принимается постоянной. Точки наблюдения помещаются в центры граничных элементов. Тогда в уравнениях (6) и (7) плотность заряда можно вынести из-под знака интеграла и, таким образом, свести уравнения (6) и (7) к системе уравнений вида

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_j(Q) &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sigma_i \int_{S_i} \frac{1}{4\pi\epsilon_a r_{QM}} dS_i \\ -2\pi\sigma_j(Q) &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sigma_i \int_{S_i} \frac{\cos(\vec{r}_{QM}; \vec{n}_Q)}{r_{QM}^2} dS_i \end{aligned} \right., \quad (8)$$

где j, i – номера граничных элементов;

$\varphi_j(Q)$ – потенциал в точке наблюдения Q , принадлежащей j – тому граничному элементу, В;

σ_i – поверхностная плотность заряда в пределах i – того граничного элемента, Кл/м²;

σ_j – поверхностная плотность заряда в пределах j – того граничного элемента, Кл/м²;

S_i – площадь i – того граничного элемента, m^2 .

Интегралы, входящие в уравнения (8), вычислены методом поточечной коллокации. В этом способе применяют граничные элементы прямоугольной или квадратной формы. Действие каждого граничного элемента считается равным действию точечного заряда, размещенного в центре граничного элемента и имеющего заряд, равный полному заряду граничного элемента. Точки влияния размещаются также в центрах граничных элементов.

Если точка влияния и точка наблюдения не совпадают, то коэффициенты первого уравнения системы (8) определяют по формуле потенциала точечного заряда

$$\alpha_{ij} = \frac{S_i}{4\pi\epsilon_a r_{ij}}, \quad (9)$$

где α_{ij} – коэффициент, связывающий поверхностную плотность заряда элемента i с потенциалом поля этого элемента в центре элемента j , m^2/Φ ;

r_{ij} – расстояние между центрами граничных элементов i и j , m .

В случае, если точки влияния и наблюдения совпадают, коэффициенты первого уравнения системы (8) определяют по формуле

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \left(2a \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + 2b \operatorname{Arsh} \frac{a}{b} \right), \quad (10)$$

где α_{ii} – коэффициент, связывающий поверхностную плотность заряда граничного элемента со значением потенциала в его центре, m^2/Φ ;

a и b – размеры граничного элемента (длина и ширина), m .

Коэффициенты второго уравнения системы (8) можно определить из выражения, полученного из соотношения для нормальной составляющей электростатической индукции точечного заряда.

$$\omega_{ij} = \left(\frac{\Delta x_{ij}}{r_{ij}^3} n_{xj} + \frac{\Delta y_{ij}}{r_{ij}^3} n_{yj} + \frac{\Delta z_{ij}}{r_{ij}^3} n_{zj} \right) S_i, \quad (11)$$

где ω_{ij} – коэффициент, отражающий зависимость нормальной составляющей электростатической индукции в центре j -того граничного элемента от заряда i –того граничного элемента;

Δx_{ij} – разность координат x i -того и j -того элемента, m ;

Δy_{ij} – разность координат y i -того и j -того элемента, m ;

Δz_{ij} – разность координат z i -того и j -того элемента, m ;

n_{xj} – орт нормали по оси x в центре граничного элемента j , m ;

n_{yj} – орт нормали по оси y в центре граничного элемента j , m ;

n_{zj} – орт нормали по оси z в центре граничного элемента j , m .

В случае совпадения точек влияния и наблюдения выражение (11) обращается в бесконечность. Можно принять коэффициент ω_{ii} равным нулю.

Решение системы уравнений (8) производится в два этапа, по аналогии с методом комбинирования прямого и итерационного способов решения

систем линейных алгебраических уравнений. Второе уравнение системы является однородным. Поэтому целесообразно использовать его на первом этапе расчета. На втором этапе решается первое уравнение, при этом результаты первого этапа являются начальным приближением для второго этапа. На обоих этапах расчета применяется одна и та же сетка граничных элементов.

Второе уравнение системы уравнений (8) может быть решено для внутренней задачи Дирихле методом последовательных приближений Робэна. Последовательные приближения метода Робэна осуществляются по формуле

$$\sigma_j^k(Q) = -2 \sum_{i=1}^N \sigma_i^{k-1}(M) \frac{w_{ij}}{4\pi}, \quad (12)$$

где $\sigma_j^k(Q)$ – поверхностная плотность заряда граничного элемента, содержащего точку наблюдения Q на k -той итерации, Кл/м²;

$\sigma_i^{k-1}(M)$ – поверхностная плотность заряда граничного элемента, содержащего точку влияния M на $k-1$ вой итерации, Кл/м².

В формуле (12) суммирование влияния граничных элементов по отдельным граничным поверхностям заменено общей суммой по всем граничным элементам.

Для сходимости процесса последовательных приближений (12) должно выполняться условие: полный заряд отдельных граничных поверхностей задачи на текущей итерации равен их полному заряду на предшествующей итерации. За начальное приближение процесса (12) принимается

$$\sigma_i^0 = \frac{\varphi_z}{\alpha_{ij}}, \quad (13)$$

где φ_z – потенциал, заданный на граничной поверхности, которой принадлежит данный граничный элемент, В.

Условие окончания процесса (12) заключается в следующем: среднеквадратичное отклонение разности потенциалов двух граничных элементов, принадлежащих одной граничной поверхности, должно быть меньше некоторой предварительно заданной величины.

На втором этапе расчета следует решить первое уравнение системы (8). Отличительной особенностью систем линейных алгебраических уравнений метода граничных элементов вида (8) является то, что в матрице коэффициентов этих систем диагональные коэффициенты превосходят все прочие. Это позволяет применить для решения первого уравнения системы (8) метод Некрасова. Условия сходимости метода Некрасова слабее условий сходимости метода простой итерации. При нахождении k -того неизвестного на текущей итерации используются уже найденные на этой итерации значения неизвестных с номерами, меньшими k . В этом заключается достоинство метода Некрасова, позволяющие эффективно использовать его при численных расчетах статических полей.

Алгоритм расчетов методом Некрасова можно записать следующим образом

$$[\sigma^{k+1}] = [\sigma^k] + [B]([\varphi_2] - [A] \times [\sigma^k]), \quad (14)$$

где $[\sigma^{k+1}]$ – матрица-столбец неизвестных плотностей зарядов граничных элементов на итерации номер $k+1$;

$[\sigma^k]$ – матрица-столбец неизвестных плотностей зарядов граничных элементов на k -той итерации;

$[B]$ – матрица, обратная диагональной матрице матрицы коэффициентов $[A]$;

$[\varphi_2]$ – матрица-столбец потенциалов граничных элементов, равных, в свою очередь, потенциалам тех граничных поверхностей, которым граничные элементы принадлежат;

$[A]$ – квадратная матрица коэффициентов линейных уравнений.

В качестве начального приближения метода Некрасова принимается

$$\sigma_i^0 = \frac{\sigma_i^I \varphi_{2i}}{\varphi_2^I}, \quad (15)$$

где σ_i^0 – начальное значение поверхностной плотности заряда граничного элемента в методе Некрасова, Кл/м²;

σ_i^I – поверхностная плотность заряда граничного элемента, полученная при решении второго уравнения системы (10), Кл/м²;

φ_2^I – потенциал граничного элемента, полученный на первом этапе расчета, В.

Условием окончания итерации метода Некрасова является: среднеквадратическое отклонение заданных потенциалов граничных элементов от потенциалов этих же элементов, вычисленных по найденным на k -той итерации поверхностным плотностям зарядов, меньше некоторой предварительно заданной величины.

Проводники, на которых наводится напряжение помех, являются изолированными и изначально незаряженными. В частном случае, когда поперечные размеры проводника малы по сравнению с его длиной, можно принять, что потенциал проводника в поле некоторого распределения заряда численно равен среднему потенциалу невозмущенного поля вдоль длины проводника. Очевидно, для шин печатных плат ТС ЖАТ реализуется этот частный случай. Тогда напряжение, наведенное на линии шины микроселектронного устройства, может быть определено по формуле

$$U_{cp} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l}, \quad (16)$$

где U_{cp} – средний потенциал, В;

l – длина проводника, м.

r_1 – расстояние от точечного заряда до одного конца проводника, м;

r_2 – расстояние от точечного заряда до второго конца проводника, м.

Для реализации предложенного метода на ЭВМ было разработано соответствующее программно-математическое обеспечение в среде визуального проектирования Delphi 3. Проверка метода осуществлялась путем решения модельной задачи о расчете поля внутри прямоугольного параллелепипеда с размещенной внутри тонкой заземленной прямоугольной пластинкой.

При решении модельной задачи, исследовались: характер сходимости процессов вычислений на обоих этапах, фактическая погрешность расчета на обоих этапах. Исследования показали, что предложенный процесс решения сходится на обоих этапах расчета и позволяет находить численное решение системы интегральных уравнений электростатического поля, с высокой точностью удовлетворяющее граничным условиям.

В четвертой главе разработан порядок проверки предложенных во второй и третьей главах диссертационной работы методов математического моделирования воздействия ЭСР на микроэлектронные системы железнодорожной автоматики и телемеханики и описаны результаты поставленных с целью проверки экспериментов.

Для проверки следует провести анализ помехоустойчивости некоторого технического средства ЖАТ методом моделирования и выполнить лабораторные испытания с учетом результатов моделирования. Результаты испытаний следует сравнить с результатами проверки устойчивости к электростатическому разряду по принятой в настоящее время методике. В последней поиск точек испытательных воздействий производится экспериментально, а в предлагаемой методике поиск тех же точек ведется расчетным путем. Поэтому результаты испытания по принятой методике могут служить для проверки предлагаемой модели устойчивости технических средств к электростатическому разряду, так как они получены чисто экспериментальным путем.

Для подтверждения выбранной модели следует произвести измерение амплитуды импульсов напряжения, наведенных на шины печатных плат устройства ЖАТ при электростатическом разряде на корпус этого устройства.

Для апробирования предлагаемых методик использовался адаптер связи АС-15, входящий в состав аппаратуры диспетчерской централизации «Неман».

С помощью разработанного программно-математического обеспечения был выполнен расчет наводок на шины узлов адаптера связи и энергии помех, рассеиваемой во входных цепях узлов адаптера, при третьей степени жесткости испытательного воздействия. Результаты расчета приведены в таблицах 1 и 2.

Для интегральных микросхем уровень энергии помех, при котором наблюдаются нарушения режимов функционирования, находится в пределах $8 \cdot 10^{-7}$ - $10 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Таблица 1 – Напряжения, наведенные в узлах адаптера связи АС-15

Наименование модуля	Наведенное напряжение, В
Соединительный	192,6
Контроля	456,7
Связи с ЭВМ	535,1
Телеуправления	526,2
Фильтра-демодулятора 1	575,8
Фильтра-демодулятора 2	583,2
Фильтра-демодулятора 3	586,6
Фильтра-демодулятора 4	588,8
Фильтра-демодулятора 5	584,2
Коммутации каналов	481,5

Из таблицы 2 видно, что уровни энергии помех, рассеиваемой в узлах адаптера связи АС-15 меньше предельных. Поэтому можно заключить, что испытания адаптера на устойчивость к ЭСР должны дать положительный результат.

С помощью осциллографа С 1-104 была измерена амплитуда помехового напряжения на шине платы фильтра-демодулятора 5. Среднее значение напряжения помех по результатам измерения составило 634 В, таким образом относительная погрешность измеренного (таблица 1) и рассчитанного напряжения составляет 8,5%, что достаточно для целей инженерной практики.

Испытания адаптера связи АС-15 средств на устойчивость к электростатическим разрядам проводились по методике, разработанной на основе ГОСТ 29191-91 с учетом результатов второй и третьей глав диссертационной работы. Для создания испытательных импульсов использовался испытательный генератор BESTemc производства фирмы Schaffer Limited.

Для проверки правильности функционирования адаптера связи при воздействии ЭСР применялся комплекс испытательного оборудования, схема которого показана на рисунке 2. Комплекс позволяет обнаруживать искажения команд телеуправления при работе адаптера связи в условиях воздействия помех.

Испытания, выполненные в соответствии с предлагаемой методикой, показали, что адаптер связи АС-15 испытания третьей степени жесткости на устойчивость к электростатическим разрядам по ГОСТ 29191-91 выдержал. В лаборатории «Безопасность и ЭМС технических средств» были выполнены испытания того же адаптера связи на устойчивость к электростатическим разрядам по апробированной методике при той же степени жесткости. В этом случае также был сделан вывод о том, что адаптер связи выдержал испытание.

Таблица 2 – Уровни энергии помех, рассеиваемой в узлах адаптера АС-15

Наименование модуля	Тип интегральных микросхем	Входное сопротивление, Ом	Энергия помех, Дж
Контроля	K561ИЕ10	10^6	$3,82 \cdot 10^{-9}$
Связи с ЭВМ	K1533ЛА2	10^5	$3,25 \cdot 10^{-8}$
	K155КП1	10^4	$5,25 \cdot 10^{-7}$
Фильтра-демодулятора	ЭКР554СА3А	$3 \cdot 10^8$	$2,12 \cdot 10^{-11}$
Телеуправления	K561ИР2	$8 \cdot 10^5$	$6,34 \cdot 10^{-9}$
	K1533КП2	10^5	$5,07 \cdot 10^{-8}$
	K157УД1	$4 \cdot 10^7$	$1,27 \cdot 10^{-10}$

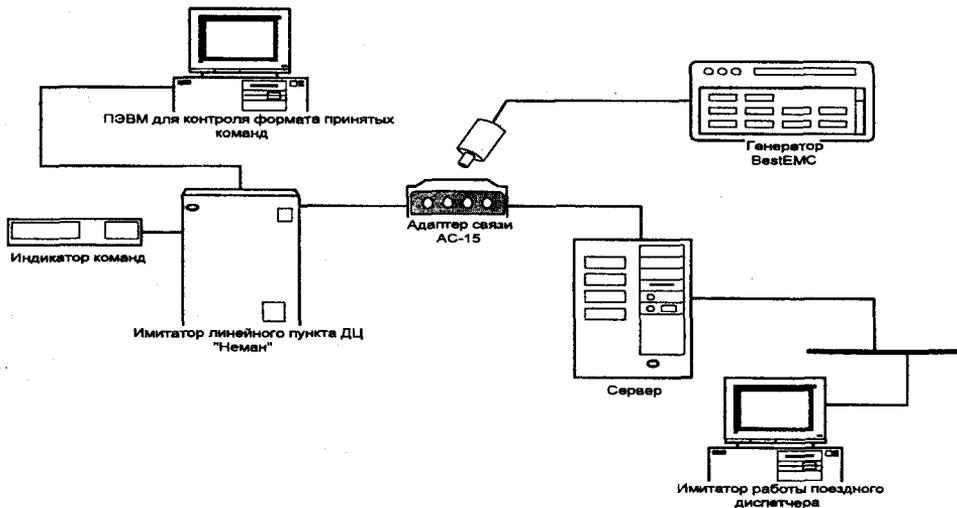


Рисунок 2- Схема испытания адаптера связи АС-15 на устойчивость к электростатическому разряду

Таким образом, сопоставляя результаты моделирования и двух независимых испытаний можно заключить, что предложенная модель помехоустойчивости позволяет прогнозировать исход лабораторных испытаний. Кроме того, результаты испытаний с учетом результатов моделирования и по апробированной методике приводят к одним и тем же выводам об устойчивости испытываемого технического средства. Это позволяет заключить, что предложенная модель помехоустойчивости может быть применена для анализа устойчивости технических средств микроэлектронных систем ЖАТ к электростатическому разряду.

В заключении сформулированы основные результаты выполненной работы, которые можно свести к следующему:

1. Установлено, что существующие методы анализа воздействия ЭСР на микроэлектронные устройства трудно применимы для анализа устойчивости микроэлектронной аппаратуры СЖАТ в силу либо недостаточной детализации, либо сложности математического аппарата. Кроме того, существующие методы слабо связаны с моделями помехоустойчивости реальных устройств СЖАТ. Поэтому для устройств СЖАТ требуется разработка улучшенных моделей воздействия ЭСР [2, 6, 10].
2. Разработана вероятностно-статистическая модель воздействия электростатического разряда на устройства СЖАТ для анализа устойчивости устройств СЖАТ к ЭСР с учетом характеристик помех и особенностей самого устройства. Предложено использовать энергию помех в качестве обобщенного параметра для описания электромагнитных помех в узлах микроэлектронных СЖАТ. Выработаны критерии устойчивости ТС ЖАТ к ЭСР [2, 4, 5, 10, 12, 13].
3. Показано, что при расчете электромагнитного поля ЭСР можно ограничиться рассмотрением электрической составляющей поля в ближней зоне [2, 5, 6, 7].
4. Предложен метод выбора на основе результатов моделирования точек испытательных воздействий на микроэлектронные СЖАТ и порядка обхода точек, что позволяет сократить время лабораторных испытаний на устойчивость к ЭСР [2, 4, 5, 8, 10].
5. Разработана методика для расчета электростатических полей с помощью метода граничных элементов, отличающаяся последовательным решением двух систем линейных алгебраических уравнений, следующих из двух интегральных уравнений электростатического поля. Создано программно-математическое обеспечение для реализации предложенного метода на ЭВМ [1, 3, 9, 11, 14].
6. По разработанной модели проведено исследование воздействия ЭСР на адаптер связи АС-15 ДЦ «Неман». Показано совпадение результатов моделирования и испытания данного микроэлектронного устройства СЖАТ [4, 5, 8, 13].

В приложениях приведены листинги программных модулей по построению сетки граничных элементов и решению систем линейных алгебраических уравнений, величины невязок в ходе расчета характеристик электростатического поля, листинг результатов решения модельной задачи, протокол исследовательского испытания адаптера связи АС-15 на устойчивость к электростатическому разряду.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Комнатный Д.В.* Решение второй основной задачи электростатики методом последовательных приближений // Сборник научных трудов

аспирантов и магистрантов /Под ред. В. И. Сенько. – Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2002. – Вып. 2. – С. 90-99.

2. *Бочков К.А., Комнатный Д.В.* Определение устойчивости микроэлектронных СЖАТ к электростатическому разряду вероятностным методом // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2002. – № 2(5). – С. 39-41.

3. *Могила В.С., Комнатный Д.В.* Расчет прямоугольного электростатического экрана численным методом // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2002. – № 2(5). – С. 41-43.

4. *Комнатный Д.В.* Повышение адекватности испытаний микроэлектронных СЖАТ на устойчивость к электростатическому разряду // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2003. – № 1(6). – С. 38-40.

5. *Комнатный Д.В.* Численное моделирование устойчивости микроэлектронных СЖАТ к электростатическому разряду // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость. Труды международного семинара / Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель, 2001. – С. 130-135.

6. *Бочков К.А., Комнатный Д.В.* Обзор и анализ методов расчета полей электростатического разряда на микроэлектронную аппаратуру // Актуальные проблемы развития транспортных систем. Тезисы докладов международной научно-технической конференции. / Белорусский государственный университет транспорта, – Гомель, 1998. – С.148.

7. *Комнатный Д.В.* Численное моделирование помех, созданных электростатическими разрядами // Проблемы безопасности на транспорте. Тезисы докладов международной научно-технической конференции. / Белорусский государственный университет транспорта, – Гомель, 2000. – С. 107-108.

8. *Комнатный Д.В.* Выбор точек воздействия при испытаниях систем железнодорожной автоматики и телемеханики на устойчивость к электростатическим разрядам // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса. Труды международной научно-практической конференции / Белорусский государственный университет транспорта, – Гомель, 2001. – С. 20.

9. *Комнатный Д.В.* Метод расчета электростатических полей для решения задач электромагнитной совместимости // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса. Труды международной научно-практической конференции / Белорусский государственный университет транспорта, – Гомель, 2001. – С. 18-19.

10. *Бочков К.А., Комнатный Д.В.* Вероятностный метод определения устойчивости микроэлектронных СЖАТ к электростатическому разряду // Проблемы безопасности на транспорте. Тезисы докладов международной научно-практической конференции / Белорусский государственный университет транспорта, – Гомель, 2002. – С. 161-162.

11. *Могила В.С., Комнатный Д.В.* расчет экранирующего эффекта прямоугольной пластины методом граничных элементов // Проблемы безопасности на транспорте. Тезисы докладов международной научно-практической конференции / Белорусский государственный университет транспорта, – Гомель, 2002. – С. 182-184.

12. *Комнатный Д.В.* Расчет влияния электростатического разряда на рецепторы помех // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов (Речица, 26 ноября 1999 г.) / Производственное объединение «Белоруснефть». – Гомель, 2000. – С. 134-136.

13. *Комнатный Д.В.* Моделирование устойчивости микроэлектронной техники к воздействию электростатического разряда // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов (Речица, 25 мая 2001 г.) / РУП «Производственное объединение Белоруснефть». – Гомель, 2001. – С. 114-116.

14. *Комнатный Д.В.* Способ построения граничных элементов при расчете электростатических полей // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов (Речица, 16 ноября 2002 г.) / РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». – Гомель, 2002. – С. 166-170.

РЭЗЮМЕ

Комнатны Дзмітрый Віктаравіч

Метады выпрабаванняў устройстваў чыгуначнай аўтаматыкі на ўстойлівасць к электростатычным разрадам

Ключавыя словы: выпрабаванні, сістэмы аўтаматыкі і тэлеmechanікі, матэматычная мадэль, электростатычны разрад, памехаустойлівасць, бяспечнасць.

Ў якасці аб'екта даследавання выступаюць устройства мікраэлектронных сістэм чыгуначнай аўтаматыкі і тэлеmechanікі, выконваючыя функцыі кіравання рухам цягнікоў і забеспячэння бяспечнасці перавозачнага працэса. Прадметам даследавання з'яўляецца распрацоўка матэматычных мадэляў ўздзеяння ЭСР на вузлы СЧАТ, мадэляў памехаустойлівасці СЧАТ, метадаў разліку памех у вузлах СЧАТ, пазваляючых вызначыць ўстойлівасць СЧАТ к электростатычнаму разраду на этапе праектна-канструктарскіх распрацовак, метадаў выбару месцаў прыкладання тэставых разрадаў і паслядоўнасці іх абхода.

Мэтай дысертацыі з'яўляецца распрацоўка і эксперыментальная праверка метадаў, алгарытмаў і праграм для даследавання ўплыву электростатычнага разрада на тэхнічныя сродкі, прыборы і ўстройства, дазваляючых шляхам разліку аналізаваць ўстойлівасць мікраэлектронных СЧАТ к электростатычнаму разраду, а таксама выбіраць пункты ўздзеяння пры выпрабаваннях мікраэлектронных СЧАТ. Адпаведна з указаннай мэтай ў рабоце пастаўлены і вырашаны наступныя задачы:

- пабудова матэматычнай мадэлі ўздзеяння ЭСР на рэцэптары памех у мікраэлектронных СЧАТ;
- стварэнне мадэлі памеха ўстойлівасці тэхнічных сродкаў СЧАТ;
- распрацоўка спосабаў разліку ўздзеяння электростатычнага разраду на мікраэлектронныя вузлы СЧАТ;
- распрацоўка метада вызначэння колькасці характэрных статычных і квазістатычных электрычных палеў;
- распрацоўка спосаба адшукання пунктаў выпрабавальных ўздзеянняў на устройствах СЧАТ.

Рэзультаты дысертацыйнай работы былі скарыстаны пры выпрабаваннях на памехаўстойлівасць і электрамагнітную сумяшчальнасць сістэмы дыспетчарскай цэнтралізацыі "Нёман".

Атрыманныя рэзультаты могуць выкарыстоўвацца пры выпрабаваннях сістэм чыгуначнай аўтаматыкі і тэлеmechanікі на электрамагнітную сумяшчальнасць.

РЕЗЮМЕ

Комнатный Дмитрий Викторович

Методы испытаний устройств железнодорожной автоматики на устойчивость к электростатическим разрядам

Ключевые слова: испытания, системы автоматики и телемеханики, математическая модель, электростатический разряд, помехоустойчивость, безопасность.

В качестве объекта исследования выступают устройства микроэлектронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики, выполняющие функции управления движением поездов и обеспечения безопасности перевозочного процесса. Предметом исследования является разработка математических моделей воздействия ЭСР на узлы СЖАТ, моделей помехоустойчивости СЖАТ, методов расчета помех в узлах СЖАТ, позволяющих определять устойчивость СЖАТ к электростатическому разряду на этапе проектно-конструкторских разработок, методов выбора мест приложения тестовых разрядов и последовательности их обхода.

Целью диссертации является разработка и экспериментальная проверка методов, алгоритмов и программ для исследования воздействия электростатического разряда на технические средства, приборы и устройства, позволяющих расчетным путем анализировать устойчивость микроэлектронных СЖАТ к электростатическому разряду, а также выбирать точки воздействий при испытаниях микроэлектронных СЖАТ. В соответствии с указанной целью в работе поставлены и решены следующие задачи:

- построение математической модели воздействия ЭСР на рецепторы помех в микроэлектронных СЖАТ;
- создание модели помехоустойчивости технических средств СЖАТ;
- разработка способов расчета влияния электростатического разряда на микроэлектронные узлы устройств СЖАТ;
- разработка метода определения количественных характеристик статических и квазистатических электрических полей;
- разработка способа отыскания точек испытательных воздействий на устройства СЖАТ.

Результаты диссертационной работы были использованы при испытаниях на помехоустойчивость и электромагнитную совместимость системы диспетчерской централизации «Неман».

Полученные результаты могут быть использованы при испытаниях систем железнодорожной автоматики и телемеханики на электромагнитную совместимость.

THE SUMMARY

Kommatny Dzmitry Viktorovich

Test methods of the devices of railway automatic to the electrostatic discharge stability

Key words: tests, systems of automatic and telemechanics, mathematical model, electrostatic discharge, noise immunity, safety.

The research objects are devices of the microelectronic systems of the railway automatics and telemechanics, having the function of train dispatching and securing the safety of the carriage process. The research subject is the development of the mathematical models of the ESD exposure to the units of SRAT, of the models of noise immunity of SRAT, of the methods of disturbance calculation in SRAT units, letting to determine the SRAT stability to the electrostatic discharge on the phase of the project and engineering development, of the methods of place choice of the test charge appliance and of succession of their avoiding.

The dissertation aim is the development and experimental control of the methods, algorithms and programs to research the electrostatic discharge exposure to the hardware components, instruments and devices, letting by means of calculation to analyze the microelectronic SRAT stability to the electrostatic discharge and also to choice the exposure points during the tests of the microelectronic SRAT. According to the mentioned aim the following problems are settled and solved in the work:

- creating of the mathematics model of the ESD exposure to disturbance receptors in the microelectronic SRAT;
- creating of the model of noise immunity of the hardware components of SRAT;
- development of the calculation means of the electrostatic discharge exposure to the microelectronic units of the devices of SRAT;
- development of the method of determination of the quantity characteristics of the static and quasi-static fields;
- development of the methods of point finding of the test exposure to the devices of SRAT.

The results of the dissertation were used at the tests to the noise immunity and electromagnetic compatibility of the centralized traffic control system "Neman".

The obtained results can be used at the test of the railway automatic and telemechanics systems to the electromagnetic compatibility.

Научное издание

Дмитрий Викторович КОМНАТНЫЙ

**Методы испытаний устройств железнодорожной автоматики на
устойчивость к электростатическим разрядам**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 16.01.2004 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз. Зак. № 68.

Типография БелГУТа, 246022, г. Гомель, ул. Кирова, 34.

Лицензия ЛПТ № 360 от 26.07.99 г.