

На правах рукописи



Дроздова Анастасия Александровна

**Методики оценки и обеспечения устойчивости к электростатическому
разряду цепей электропитания радиоэлектронных устройств**

Специальность 2.2.13 –
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель – **Комнатнов Максим Евгеньевич**,
кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления ТУСУР

Официальные оппоненты – **Гизатуллин Зиннур Марселевич**,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»;

Горбачёв Анатолий Петрович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится 17 декабря 2024 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/f8oki4r0>

Автореферат разослан ____ октября 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Освоение космического пространства ужесточает существующие и предъявляет новые требования к современным космическим аппаратам (КА). Повышение помехоустойчивости и надежности КА позволяет увеличить срок их активного существования, чему препятствует электризация КА. По статистике выходов из строя и нарушений в работе КА свыше 60% их связано с воздействием электростатического разряда (ЭСР). Особо восприимчивы к ЭСР полупроводниковые приборы, воздействие на которые может привести к различным изменениям в их внутренней структуре (выгорание проводника, плавление металлизации, пробой диэлектрика и пр.). Критичной внештатной ситуацией при эксплуатации КА является отказ системы электропитания (СЭП), например, вызванный перенапряжением при попадании токов ЭСР на входы приборов бортовых радиоэлектронных устройств (РЭУ). Этому способствует контактное или воздушное воздействие ЭСР, вызывая скрытые повреждения, катастрофические и параметрические отказы, нарушающие работоспособность бортовых РЭУ КА.

Степень разработанности темы. В решение задач, связанных с ЭСР, большой вклад внесли российские ученые и специалисты: Кириллов В.Ю. и Соколов А.Б. – разработка методов и средств для испытаний бортовых РЭУ на воздействие ЭСР, Кечиев Л.Н. – анализ электромагнитных помех (ЭМП), генерируемых ЭСР, и методы защиты от его воздействия, Пожидаев Е.Д. и Кузнецов В.В. – анализ воздействия ЭСР на полупроводниковые устройства, Гизатуллин З.М. – разработка методов и моделей для анализа воздействия ЭСР на функционирование печатных плат (ПП) РЭУ. Существенен вклад зарубежных авторов Pommerenke D. и Wank K. – моделирование и проектирование генераторов ЭСР и устройств защиты от его воздействия, а также Wang A. и Ker M.-V. – разработка устройств защиты от ЭСР. Несмотря на ряд исследований по защите от ЭСР, оценка и обеспечение устойчивости цепей электропитания РЭУ к этому виду воздействия изучены мало.

Цель работы – разработать методики оценки и обеспечения устойчивости к ЭСР цепей электропитания РЭУ. Для её достижения надо решить следующие задачи:

1. Разработать модели и методику оценки восприимчивости электронных компонентов к воздействию контактного ЭСР.
2. Разработать модели оценки восприимчивости электронных компонентов к воздействию электромагнитного излучения, создаваемого ЭСР.
3. Разработать модель и методику для анализа и локализации импульсных помех в цепях электропитания РЭУ.
4. Разработать модель и способ ослабления импульсных помех в цепях электропитания с многозонным регулированием.

Научная новизна

1. Предложена методика оценки восприимчивости транзисторов к контактному воздействию электростатического разряда, отличающаяся учетом ёмкостей межсоединений печатных проводников и посадочного места.

2. Разработана модель взаимовлияния экранированной и микрополосковой линий передачи, отличающаяся использованием в замкнутой форме аналитических выражений для вычисления токов и напряжений, наведенных на микрополосковую линию передачи в ТЕМ-камере при воздействии на её вход различных сигналов.

3. Разработана модель силовой шины электропитания с проводными отводами, отличающаяся её применимостью для локализации максимума и оценки амплитуды напряжения электростатического разряда вдоль шины.

4. Предложен конвертор с многозонным регулированием выходного напряжения, отличающийся использованием не менее двух инверторов, один из которых формирует нерегулируемую, а второй – регулируемую импульсную составляющую напряжений на входе LC -фильтра.

Теоретическая значимость

1. Усовершенствованные модели транзистора позволяют учесть паразитные параметры его межсоединений на печатной плате при моделировании воздействия электростатического разряда.

2. Аналитическая модель позволяет вычислить формы тока и напряжения, наведенные на испытуемый объект при воздействии различных испытательных сигналов на вход ТЕМ-камеры.

3. Конвертор с многозонным регулированием позволяет снизить импульсные помехи входного и выходного фильтров и повысить качество выходного напряжения при минимальных массогабаритных показателях.

Практическая значимость

1. Разработанные модели и методика оценки электрических параметров силовых транзисторов к воздействию электростатического разряда позволяют на этапе проектирования оценить восприимчивость транзисторов к воздействию электростатического разряда с учётом паразитных параметров печатных плат цепей электропитания.

2. Предложенная модель анализа взаимовлияния микрополосковой линии и центрального проводника ТЕМ-камеры позволяет рассчитать наведённые токи и напряжения во временной области при воздействии импульсных и непрерывных испытательных сигналов на центральный проводник камеры.

3. Разработанная модель силовой шины электропитания с проводными отводами позволяет оценить амплитуды напряжения электростатического разряда вдоль силовой шины электропитания и оптимизировать её конструкцию для предотвращения пробоя изолятора.

4. Предложенная модель конвертора с многозонным регулированием выходного напряжения позволяет уменьшить размер и массу входных и выходных электрических фильтров с сохранением качества выходного напряжения.

5. Результаты использованы в 4 НИР, 2 предприятиях (АО «РЕШЕТНЕВ», НИИ АЭМ) и учебном процессе ТУСУРа (четыре акта внедрения).

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенная методика оценки восприимчивости транзисторов к воздействию контактного электростатического разряда позволяет вычислить

с отклонением не более 2% от результатов измерений пробой подзатворного диэлектрика транзистора на печатной плате.

2. Аналитическая модель в замкнутой форме для анализа взаимовлияния микрополосковой линии и центрального проводника ТЕМ-камеры позволяет оценить с отклонением до 25% от результатов измерений амплитуду тока и напряжения, наведенных на микрополосковую линию при воздействии на центральный проводник ТЕМ-камеры различных сигналов.

3. Модель силовой шины электропитания с проводными отводами позволяет выявить максимум напряжения импульсных кондуктивных помех для различных форм поперечного сечения силовой шины электропитания.

4. Использование конвертора с многозонным регулированием выходного напряжения на базе двух инверторов позволит уменьшить в 1,5 раза индуктивность и ёмкость LC -фильтра и пульсации тока и напряжения на элементах входного и выходного электрических фильтров.

Методология и методы исследования. В работе использованы численное моделирование методами моментов и конечных разностей и элементов, а также лабораторный эксперимент.

Достоверность основана на согласованности результатов аналитического и численного вычислений с результатами измерений лабораторных макетов.

Использование результатов

1. ПНИ «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» по проекту ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. №14.574.21.0172, 2017–2020 гг.

2. НИР «Моделирование распространения сверхкоротких импульсов в многопроводных линиях передачи для решения задач проектирования радиоэлектронной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости», грант РФФИ 19-37-51017 Научное наставничество, 2020–2021 гг.

3. Проект «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях», государственное задание FEWM-2022-0001, 2022–2024 гг.

4. НИР «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров», грант РФФИ №19-79-10162, 2019–2021 гг.

5. НИР «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров», грант РФФИ №19-79-10162-П, 2022–2024 гг.

6. НИР «Исследование систем электропитания постоянного и переменного тока телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов с многозонным

регулированием выходных параметров», грант РФФ № 23-29-0403, 2023–2024 гг.

7. Приоритет-2030. Подпроект №25а «Комплекс программ для проектирования лёгких помехозащищённых силовых шин электропитания перспективных космических аппаратов» в рамках стратегического проекта № 3 «Науки о космосе и инжиниринг», 2023 г.

8. Учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУРа.

Апробация результатов. Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих симпозиумов и конференций: Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и мол. уч. «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2020–2022 гг.; Межд. науч.-прак. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2020 г.; Int. siberian conf. on control and communications (SIBCON), г. Томск, 2022 г.; Int. conf. of young professionals in electron devices and materials (EDM), Республика Алтай, 2023, 2024 гг.; Int. conf. on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM), Сочи, 2024 г.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 29 работах (3 без соавторов): 6 статей в журналах из перечня ВАК; 8 докладов в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus; 12 докладов в трудах отечественных конференций; 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ; 2 патента на изобретение.

Личный вклад. Все результаты работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Постановка цели работы, формулировка задач исследования, обработка и интерпретация результатов выполнены с научным руководителем. Часть результатов эксперимента получена совместно с *Николаевым И.И.* и *Семенюком В.А.* Результаты по многозонному регулированию получены совместно с *Авдзейко В.И.*

Структура и объём диссертации. В диссертацию входят введение, 3 главы, заключение, список литературы из 142 наименований, 3 приложения. Объём – 145 с., в т.ч. 93 рисунка и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Существующие модели и методики воздействия электростатического разряда на элементы радиоэлектронных устройств

В разделе 1.1 описано возникновение ЭСР в КА и его влияние на элементы СЭП КА. В разделе 1.2 представлены существующие модели и методики воздействия ЭСР, применяемые при проектировании РЭУ. Описаны аналитические модели формы тока ЭСР, схемотехнические модели имитатора ЭСР, методики экспериментального воздействия. В разделе 1.3 представлен метод ослабления импульсных помех многозонным регулированием (МР). В разделе 1.4 сформулированы цель и задачи работы.

2. Модели и методика оценки восприимчивости электронных компонентов к воздействию электростатического разряда

В разделе 2.1 разработана методика оценки воздействия контактного ЭСР на транзистор с учетом паразитных параметров межсоединений. Она включа-

ет этапы: 1. Создание усовершенствованной модели транзистора, включающей геометрические и электрические параметры межсоединений транзистора на ПП. Для этого выполняется следующее. Определяется математическое описание модели кристалла транзистора, используя модели Гуммеля-Пуна для биполярного (БТ) или Шихмана-Ходжеса для полевого (ПТ) транзисторов и пр., а также задаются команды SPICE для их применения. Модель кристалла транзистора дополняется паразитными параметрами посадочного места транзистора на ПП со слоем припоя, а также электродов и межсоединений внутри корпуса. Учитываются межсоединения, в виде линий передачи на ПП, подключенные к электродам транзистора. Для этого создаются геометрические и электростатические модели и вычисляются их собственная и взаимная ёмкости. 2. Создаётся SPICE-модель в виде эквивалентной электрической схемы, содержащая модель кристалла и вычисленные ёмкости межсоединений. Назначаются порты на эквивалентной схеме и присваиваются параметры, позволяющие моделировать транзистор как единый компонент. 3. Подключается к эквивалентной электрической схеме SPICE-модель источника ЭСР, имитирующая его контактное воздействие. 4. Вычисляются вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзистора без источника ЭСР и с ним. По ВАХ оценивается его чувствительность к контактному воздействию ЭСР.

Разработаны геометрические модели для фрагментов микрополосковой (МЛП), копланарной (КЛП) и связанной (СЛП) линий передачи на двухслойной и трехслойной ПП для их использования в предложенной методике. Синтезированы значения геометрических параметров МЛП, СЛП и КЛП под $Z_b = 50$ Ом с подложкой из стеклотекстолита с $\epsilon_r = 4,5$. Созданы модели посадочных мест транзисторов для широко применяемых корпусов поверхностного монтажа TO-220, TO-263, SOT-89 и SOT-23-3, межсоединений посадочного места транзистора с его корпусом (модель электродов транзистора), а также межсоединений в виде проводников, соединяющих электроды с кристаллом в корпусе транзистора. Используя разработанные модели межсоединений, создана усовершенствованная модель ПТ/БТ (рисунок 2.1), включающая транзистор I , его корпус 2 и посадочное место 3 . Корректность модели подтверждается совпадением полученных ВАХ с представленными в технической документации (ТД) на МОП-транзистор IRFZ46N.

В результате аналитического обзора, найдена схемотехническая модель имитатора ЭСР, форма тока которой совпадает с формой из стандарта и измеренной (рисунок 2.2а). Создана комплексная модель (рисунок 2.2б) для вычисления амплитуды воздействующего напряжения ЭСР на транзистор, включающая схемотехническую модель имитатора ЭСР и усовершенствованную модель транзистора.

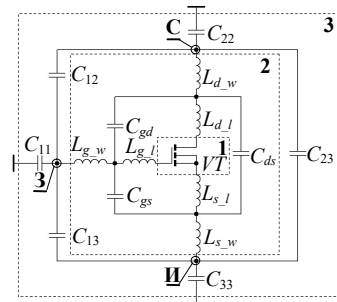


Рисунок 2.1 – Усовершенствованная модель ПТ

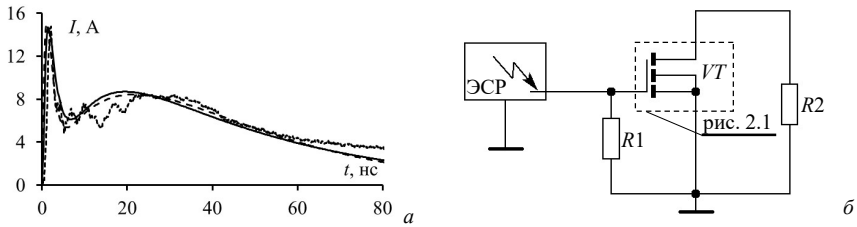


Рисунок 2.2 – Формы токов ЭСР из стандарта (—), измеренная (---), по схемотехнической модели (—) (а) и комплексная модель для оценки воздействия ЭСР на транзистор (б)

Используя усовершенствованную модель (рисунок 2.1), моделировалось воздействие ЭСР на транзистор с учётом паразитных параметров межсоединений и без него. Зависимости амплитуды напряжения затвор-исток $U_{зи}$ от амплитуды напряжения ЭСР $U_{ЭСР}$ представлены на рисунке 2.3.

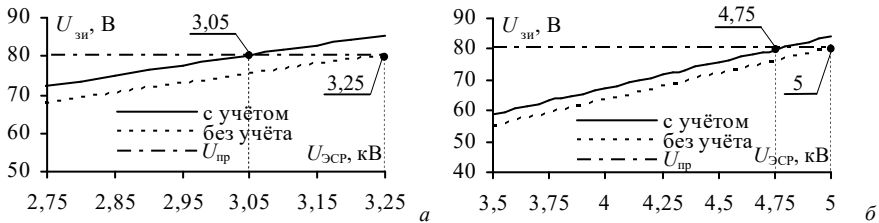


Рисунок 2.3 – Зависимости $U_{зи}$ от $U_{ЭСР}$ с учётом и без учёта паразитных ёмкостей для IRFZ46N (а) и IRF4095 SPbF (б)

Согласно ТД напряжение пробоя ($U_{пр}$) подзатворного диэлектрика транзисторов серии IRF составляет 80 В. Из рисунка 2.3 видно, что для транзистора IRFZ46N без учёта паразитных ёмкостей пробой происходит при $U_{ЭСР} = 3,25$ кВ, а с учётом – 3,05 кВ, а для IRF4095 SPbF – при 5 и 4,75 кВ, соответственно. В результате для IRFZ46N восприимчивость к ЭСР увеличилась на 6,2%, а для IRF4095 SPbF – на 5%.

Выполнен эксперимент по воздействию ЭСР на данные транзисторы, установленные на ПП. Измерены ВАХ для двух групп из трёх одинаковых транзисторов IRFZ46N и IRF4095 SPbF из одной партии в корпусах TO-220 и TO-263, после постепенного роста $U_{ЭСР}$ с шагом 0,1 кВ. Усреднённые результаты измерений приведены на рисунке 2.4.

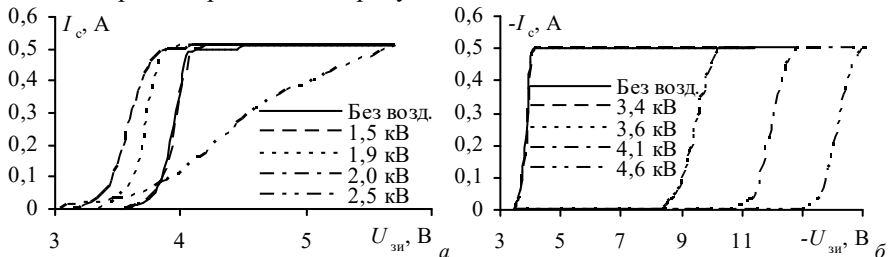


Рисунок 2.4 – Измеренные передаточные ВАХ транзисторов IRFZ46N (а) и IRF4095 SPbF (б) после воздействия ЭСР

Из рисунка 2.4а видно, что для транзистора IRFZ46N после воздействия ЭСР с амплитудами напряжения 1 и 1,5 кВ характер ВАХ не изменился и крутизна сохранилась в пределах 2–2,2 А/В. ЭСР с амплитудами 1,9 и 2 кВ сместил ВАХ в область более низких $U_{зи}$, до 3,6 В и 3,4 В соответственно, а крутизна уменьшилась до 1,2 А/В. ЭСР с амплитудой 2,5 кВ снизил крутизну до 0,2–0,3 А/В, а ЭСР с амплитудой 3 кВ пробил подзатворный диэлектрик и транзисторы вышли из строя. Для IRF4095 SPbF ЭСР с амплитудой от 1 до 3,4 кВ не повлиял на ВАХ и крутизна сохранилась 2–2,2 А/В (рисунок 2.4б). После ЭСР с амплитудой 3,5–4,6 кВ ВАХ смещалась в область высоких $U_{зи}$, до 7,95 В и 13,1 В, соответственно, а крутизна уменьшилась до 0,4–0,45 А/В. ЭСР с амплитудой 4,7 кВ пробил подзатворный диэлектрик. Последующие многократные измерения приводили к аналогичным результатам.

В результате отклонение результатов моделирования и эксперимента составило 0,05 кВ (менее 2%), что говорит о хорошей согласованности результатов эксперимента и моделирования.

В разделе 2.2 представлена разработанная аналитическая модель для оценки наведенного тока и напряжения на электронный компонент (ЭК), расположенный в ТЕМ-камере. Изначально для приближения к ЭК использовалась МЛП. Ток (I_K), протекающий в центральном проводнике ТЕМ-камеры, создает магнитное поле. Связь между МЛП 1, расположенной на ПП 2, и центральным проводником 3 ТЕМ-камеры 4, при их продольном расположении, может быть представлена на основе теоремы Гаусса для магнитной индукции (рисунок 2.5). Ток I_K зависит от коэффициента стоячих волн по напряжению (КСВН) ТЕМ-камеры и напряжения, подводимого к её входу от генератора (E), а также от сопротивления (Z_K) ТЕМ-камеры и согласованной нагрузки ($Z_C = 50$ Ом). Поток вектора магнитной индукции (Φ_B), создаваемый I_K , протекающим по центральному проводнику ТЕМ-камеры с периметром $2(a+b)$ внешнего проводника, связан с длиной l МЛП, расположенной под центральным проводником на расстоянии h от низа ТЕМ-камеры. Тогда наведённый ток на МЛП может быть определен как

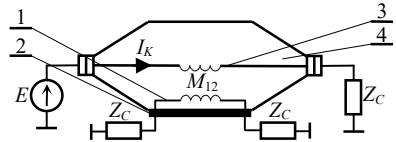


Рисунок 2.5 – Связь магнитного поля в ТЕМ-камеры с МЛП

$$I = \frac{\omega \mu_0 I_K l h}{2(a+b) Z_C} \text{КСВН}. \quad (2.1)$$

Для верификации модели создана группа поперечных сечений малогабаритной ТЕМ-камеры и МЛП для квазистатического анализа, используя метод моментов (МоМ). Представлены поперечные сечения ТЕМ-камеры (рисунок 2.6а) с расположенной внутри неё МЛП (рисунок 2.6б) и диэлектрической подложкой из стеклотекстолита ($\epsilon_r = 4,5$) (рисунок 2.6в). Используя поперечные сечения, создана принципиальная схема (рисунок 2.7а) из отрезков ЛП ($Trl1$ – $Trl5$) с сопротивлениями $R1 = R2 = 50$ Ом для согласования камеры на концах. Так, $Trl1$ и $Trl5$ имеют поперечные сечения ТЕМ-камеры без МЛП

с $l = 10$ мм, $Tr/2$ и $Tr/4$ – ТЕМ-камеры с диэлектрической подложкой с $l = 5$ мм, а $Tr/3$ – ТЕМ-камеры с МЛП с $l = 70$ мм. Для вычисления, используя метод конечных разностей во временной области (МКРВО), создана электродинамическая модель ТЕМ-камеры l с размещенной в апертуре ПП с МЛП 2 и СВЧ-соединителями 3 на её концах (рисунок 2.7б).

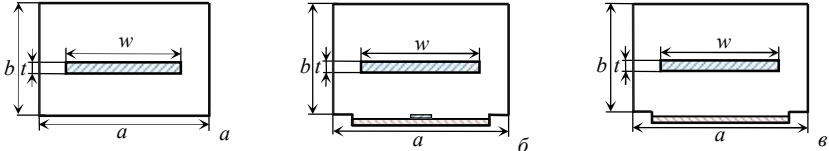


Рисунок 2.6 – Поперечные сечения ТЕМ-камеры (а) с расположенной внутри неё МЛП (б) и диэлектрической подложкой (в)

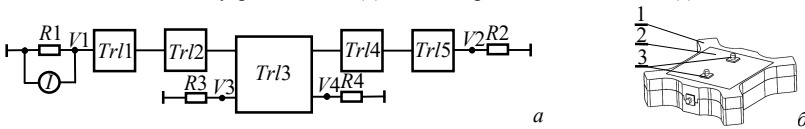


Рисунок 2.7 – Схема воздействия ЭСР на вход ТЕМ-камеры с МЛП для квазистатического анализа (а) и модель ТЕМ-камеры с МЛП (б) для электродинамического анализа

Воздействие проводилось от источников напряжения с различными параметрами импульса: длительностью (t_d), временем нарастания (t_n) и спада (t_c), а именно: ЭСР по моделям механической (ММ), заряженного устройства (МЗУ), заряженной ПП (МЗПП), заряженного кабеля (МЗК), а также сверхкороткий импульс (СКИ) и гармонические сигналы на частотах 1, 0,1 и 0,01 ГГц. Вычисленные формы тока, наведенные на МЛП при воздействии ЭСР по ММ, МЗУ, МЗПП и МЗК представлены на рисунке 2.8.

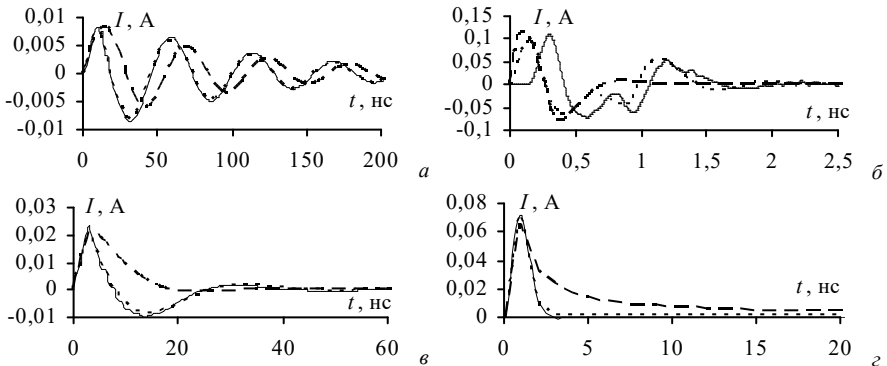


Рисунок 2.8 – Вычисленные аналитическим методом (---), МоМ (- -) и МКРВО (—) формы тока, наведенные на МЛП при воздействии источниками ЭСР по ММ (а), МЗУ (б), МЗПП (в), МЗК (г)

Видно, что ток, вычисленный по (2.1), согласуется с полученным МоМ и МКРВО, а максимальные отклонения (δ) токов, вычисленных по (2.1) и численными методами, составляют 18,8% для СКИ и 19,8% для гармонического сигнала с частотой 0,1 ГГц. Минимальные δ составляют 1,9% для ЭСР по

МЗПП (рисунок 2.8в) и 1,2% для ЭСР по ММ (рисунок 2.8а). Дополнительно вычислены наведенные токи и напряжения при изменении толщины стеклотекстолита h и длины l МЛП. Выявлено, что токи и напряжения линейно возрастают с ростом h и l . Так, с ростом h от 0,2 до 2 мм максимальные δ аналитического расчёта от МоМ и МКРВО не превышают 14,8 и 21%, соответственно, тогда как с ростом l от 10 до 80 мм – 7,7 и 24,9%.

Для подтверждения результатов моделирования, собрана установка для измерения напряжения, наведённого на МЛП. Использован адаптер между ТЕМ-камерой и имитатором ЭСР для согласования и прохождения сигнала от наконечника имитатора ЭСР внутрь ТЕМ-камеры. Схема измерения напряжения (рисунок 2.9а) состоит из источника ЭСР, адаптера в виде половины коаксиальной ТЕМ-камеры 5, ТЕМ-камеры 2, коаксиального перехода 3, резисторов 4, МЛП 6, расположенной на ПП 7, помещённой внутрь ТЕМ-камеры. Напряжение на МЛП фиксировалось осциллографом *I* R&S RTO2044 (рисунок 2.9б).

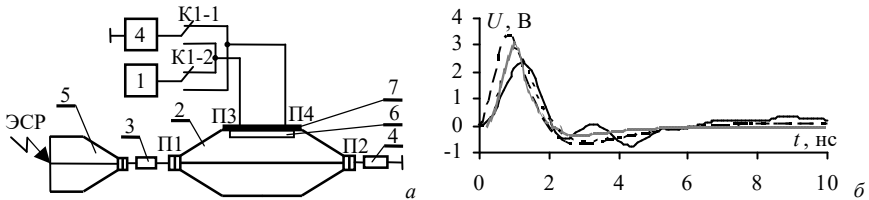


Рисунок 2.9 – Схема измерения (а) и измеренные (—), вычисленные аналитически (---), МоМ (· · ·) и МКРВО (— · —) формы напряжения (б)

Из рисунка 2.9б видно, что формы напряжения согласуются, а амплитуды напряжения составляют по (2.1) – 3 В, МоМ – 2,9 В, МКРВО – 3,4 В, а измерению – 2,35 В. Максимальные δ аналитического расчёта от МКРВО и МоМ составляют 3,3% и 13,3%, соответственно. При этом δ аналитического расчёта от измерения составляет 25%. Различия амплитуд напряжения при моделировании и измерении связаны с потерями в проводнике и диэлектрике МЛП, а также неучётом припоя СВЧ-соединителей, расположенных на внутренней стороне ПП.

В результате аналитическая модель может быть применена на начальном этапе проектирования для оценки амплитуды и формы наведённого на испытуемый объект тока и напряжения при воздействии на центральный проводник ТЕМ-камеры различных источников испытательных сигналов.

3. Методика локализации и способ ослабления импульсных помех в цепях электропитания радиоэлектронных устройств

В разделе 3.1 представлен макет помехозащищенной силовой шины электропитания (СШЭП) (рисунок 3.1). Он состоит из основы 1 длиной $l = 0,5$ м и проводных отводов 2 с соединителями 3 на концах. На СШЭП размещён помехозащитный фильтр 4 с собственными отводами 5 и соединителями на конце 6. Конструкция закреплена на металлическом основании 7. СШЭП и проводные отводы покрыты электропроводящей лентой ЛММАС для стека-

ния ЭСР и имеют площадь (S) поперечного сечения каждого полюса 50 мм^2 для обеспечения максимального тока 200 А .

В разделе 3.2 разработана методика анализа и локализации экстремумов воздействия ЭСР на СШЭП. Она включает этапы: 1. Создание геометрических моделей поперечного сечения для разных отрезков ЛП на основе заданных S проводников и электрофизических параметров изолятора для СШЭП и проводных отводов. 2. Вычисление матриц погонных коэффициентов электромагнитной (L) и электростатической (C) индукции, проводимостей (G) и сопротивлений (R). 3. Создание модели СШЭП с проводными отводами и присвоение вычисленных матриц L , C , R , G каждому отрезку ЛП. 4. Присвоение длины для каждого отрезка ЛП. 5. Выбор узлов ЛП, вдоль которой необходимо выполнить локализацию. 6. Установка числа сегментов вдоль каждого проводника отрезка ЛП на основе требуемой точности вычисления, заданной пользователем. 7. Вычисление откликов в каждом сегменте и поиск максимальных напряжений ЭСР. 8. Добавление в места с максимальным напряжением ЭСР дополнительных слоёв изоляции и сравнение полученных результатов с учетом дополнительных слоев. Разработаны геометрические модели СШЭП с прямоугольным, коаксиальным и спиральным поперечными сечениями основы и проводных отводов для их использования в предложенной методике (рисунок 3.2). Модели содержат проводники для прямых 1 и обратных 2 токов, снаружи СШЭП покрыта лентой ЛМAMc 3. Между полюсами и лентой имеются изоляторы. Во всех случаях площадь S для прямых и обратных токов составляет 50 мм^2 .

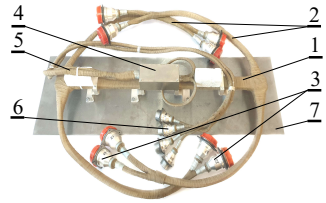


Рисунок 3.1 – Макет СШЭП

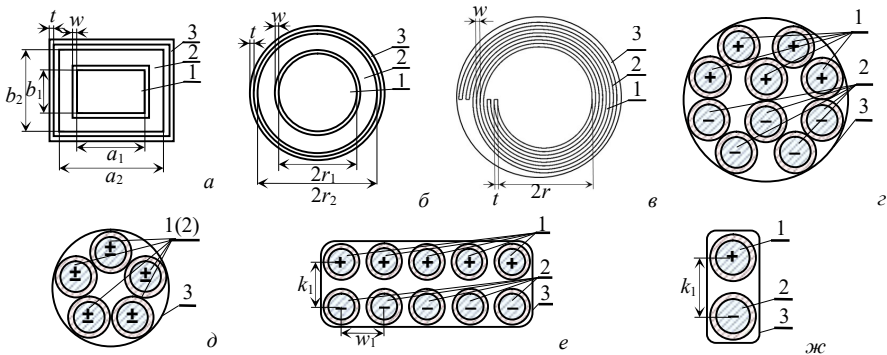


Рисунок 3.2 – Поперечные сечения прямоугольной (а), коаксиальной (б) и спиральной (в) СШЭП и проводных отводов

Проводные отводы выполнены из проводов БС 35-1298. Каждый отвод (рисунок 3.2г) выполнен из 10 проводов (5 проводов на «+» полюс 1 и 5 проводов на «-» полюс 2) для $S = 50 \text{ мм}^2$, которые покрыты ЛМAMc 3. Возле соединителя отводы разветвляются для каждого полюса (рисунок 3.2д).

Вблизи СШЭП провода расположены друг над другом (рисунок 3.2e) (сверху «+», снизу «-»), для соединения каждого полюса с основой СШЭП. Отводы из рисунка 3.2ж соединяют СШЭП с помехозащитным фильтром.

Используя разработанную методичку, создана модель СШЭП с проводными отводами (рисунок 3.3) в программе для квазистатического моделирования TALGAT. Участки ($Trl_{14} - Trl_{16}$) являются основой СШЭП с длиной $l = 0,5$ м. Участки Trl_{13} и Trl_{17} с $l = 30$ мм соединяют основу СШЭП и проводные отводы, а $Trl_{18} - Trl_{21}$ с $l = 100$ мм – с помехозащитным фильтром. Участки $Trl_9 - Trl_{12}$ имеют поперечное сечение из рисунка 3.2c с $l = 350$ мм. Возле соединителя провода разветвляются и имеют поперечное сечение для каждого полюса отдельное по 5 проводов ($Trl_1 - Trl_8$) с $l = 100$ мм (рисунок 3.2d).

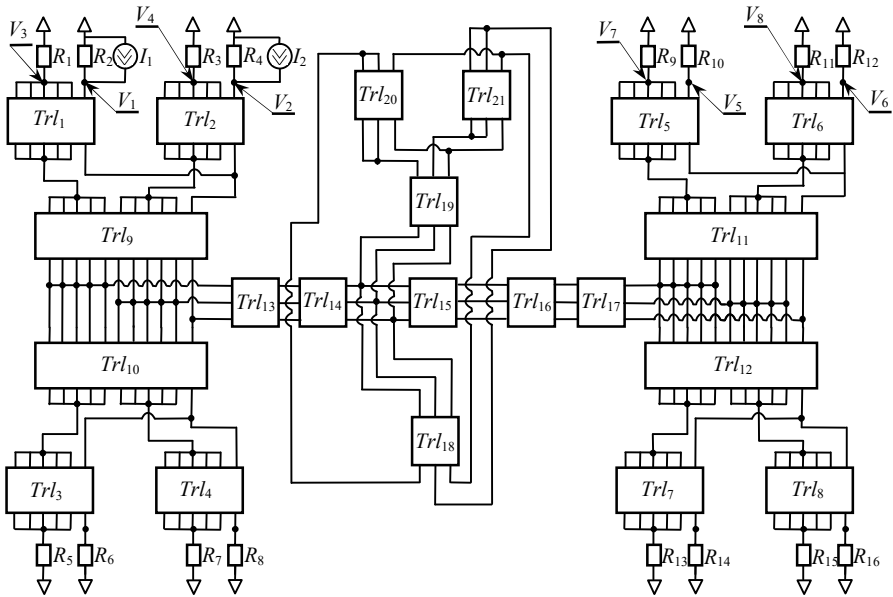


Рисунок 3.3 – Модель СШЭП с проводными отводами в системе TALGAT

Используя разработанную модель, локализован максимум напряжения ЭСР вдоль СШЭП. Моделировалось воздействие ЭСР на СШЭП в двух случаях. В первом оно оказывалось на ЛМAMс в начале «+», а во втором – в начале «-» отводов СШЭП. К началу и концу каждого отвода подключены сопротивления $R1 - R16 = 50$ Ом. При воздействии ЭСР на ЛМAMс у «+» отвода СШЭП с прямоугольным поперечным сечением основы, на «-» отводе максимум напряжения (2,1 кВ) наблюдается на участке Trl_9 на длине 145 мм от его начала (рисунок 3.4a), а на ленту у «-» отвода – максимум (2,2 кВ) находится на «+» отводе на длине 140 мм (рисунок 3.4б). Локализация максимума напряжения при воздействии ЭСР на коаксиальную и спиральную СШЭП показала, что форма напряжения и участок совпадают с полученными для прямоугольной СШЭП.

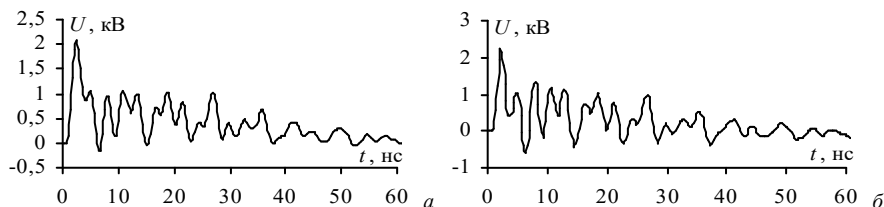


Рисунок 3.4 – Формы напряжения на участке $Tr/9$ при воздействии ЭСР на ЛМAMс у отводов «+» (а) и «-» (б)

В таблицу 3.1 сведены все результаты. Видно, что максимальные амплитуды (2,1 и 2,2 кВ) наблюдаются для прямоугольной СШЭП на длинах 145 и 140 мм. Для коаксиальной СШЭП амплитуда на 100 В меньше (2 и 2,1 кВ) и наблюдается на длине 105–100 мм, а для спиральной СШЭП максимальные напряжения как на «+», так и на «-» отводах одинаковы (2 кВ) и наблюдаются на длине 100 мм. В результате использование коаксиальной и спиральной СШЭП позволит сместить максимум напряжения ЭСР к соединителям на 40–45 мм от основы.

Таблица 3.1 – Максимальные амплитуды напряжения

Воздействие на ЛМAMс	СШЭП	$Tr/9$
У «+» отвода	Прямоугольная	2,1 кВ при $l = 145$ мм
	Коаксиальная	2 кВ при $l = 105$ мм
	Спиральная	2 кВ при $l = 100$ мм
У «-» отвода	Прямоугольная	2,2 кВ при $l = 140$ мм
	Коаксиальная	2,1 кВ при $l = 100$ мм
	Спиральная	2 кВ при $l = 100$ мм

В результате разработана методика и создана модель СШЭП с проводными отводами, позволяющие анализировать амплитуду напряжения ЭСР вдоль СШЭП и на этапе проектирования локализовать места с высоким напряжением ЭСР, что повысит надежность СШЭП.

В разделе 3.3 представлен способ ослабления кондуктивных импульсных помех с использованием МР в конверторах. МР в СЭП постоянного тока основано на дискретном или плавном разбиении полного диапазона напряжения на несколько зон регулирования (l). Способ МР заключается в использовании в формах выходного напряжения источника и потребляемого тока двух составляющих: постоянной нерегулируемой ($U_{нр}$) и импульсной регулируемой ($U_{рег}$). Для реализации МР используется конвертор на базе двух инверторов ($l = 1$). Для

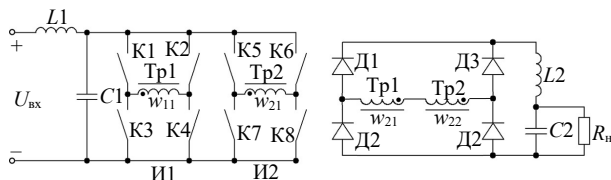


Рисунок 3.5 – Схема конвертора при $l = 1$

увеличения l необходимо увеличивать количество инверторов. Упрощенная схема конвертора с МР (рисунок 3.5) включает входной фильтр ($L1$, $C1$), инверторы напряжения (И1, И2) с трансформаторами $Tr1$ и $Tr2$, выходные обмотки (w_{21} , w_{22}) которых соединены последовательно, а их начало и конец подключены к выпрямителю ($D1$ – $D4$), выход которого соединен с нагрузкой

R_n через выходной фильтр ($L2, C2$). Формирование дискретных зон основано на суммировании выходных напряжений мостовых инверторов за счет последовательного соединения их вторичных обмоток. Первый инвертор И1 работает во всех зонах в неуправляемом режиме со сдвигом фаз (180°) управления и формирует на нагрузке U_{np} (рисунок 3.6а). Второй инвертор управляется ШИМ-сигналом или напряжением с уровнем «0» или «1» и формирует U_{per} со сдвигом фаз (180°) управления. За счет последовательного соединения w_{21} и w_{22} на входе выпрямителя формируется напряжение $U_{сум} = U_{np} + U_{per}$ (рисунок 3.6а). После выпрямителя на вход LC-фильтра поступает напряжение, содержащее U_{np} и U_{per} (рисунок 3.6б). Амплитуда U_{per} определяет относительный диапазон регулирования выходного напряжения конвертора, влияющий на значения L и C входного и выходного фильтров, а также амплитуду регулируемого тока ключей инвертора И2.

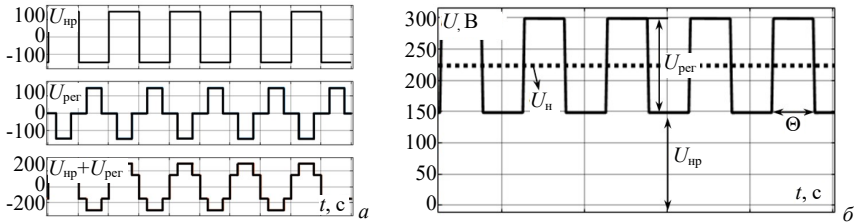


Рисунок 3.6 – Напряжения U_{np} , U_{per} на выходных обмотках Тр1, Тр2 и $U_{сум}$ на входе выпрямителя (а) и напряжение на входе LC-фильтра (б)

Диаграммы напряжения и токов на элементах входных и выходных фильтров при $l = 1$ представлены на рисунке 3.7. Видно, что ток через $L1$ содержит постоянную составляющую тока потребления $I_{потр}$ и импульсную ΔI_{L1} , характеризующую влияние конвертора на сеть электропитания. Напряжение ($U_{вх}$) на $C1$ является напряжением питания инверторов И1 и И2. Ток через $L2$ содержит постоянную составляющую, равную I_n , и импульсную составляющую, влияющую на возникновение режима прерывистых токов $L2$. Напряжение U_{C2} является напряжением питания потребителей, а его пульсации ΔU_{C2} ограничиваются требованиями потребителя.

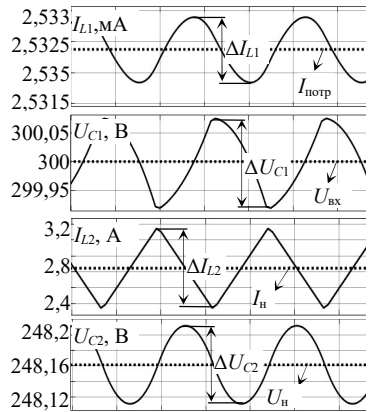


Рисунок 3.7 – Диаграммы напряжений и токов на элементах фильтров

Преимущества использования конвертора с МР подтверждены в программе MATLAB Simulink. Созданы схемы конверторов с МР и без него и вычислены пульсации на элементах входного и выходного фильтров при одинаковых параметрах. Номинальные параметры фильтров $L1 = 1,1$ мГн, $C1 = 80$ мкФ, $L2 = 1,2$ мГн, $C2 = 65$ мкФ выбраны из условий: $\Delta I_{L1} \leq 0,1 I_{потр}$,

$\Delta U_{C1} = \Delta U_{C2} \leq 0,1\% U_{н}$. Результаты моделирования сведены в таблицу 3.2, из которой видно, что использование одной регулируемой зоны позволяет уменьшить пульсации тока и напряжения в 1,5 раза. При этом для заданных пульсаций в схеме конвертора без МР необходимо увеличить номиналы элементов входного и выходного фильтра в 1,5 раза. Конвертор с $l = 2$ позволяет уменьшить ΔI_{L1} в 1,7 раза, пульсации ΔI_{L2} , ΔU_{C1} , ΔU_{C2} – не менее 1,8 раза, а $l = 5$ – не менее 2,5 раза.

Таблица 3.2 – Пульсации на элементах конвертора без МР и с ним

	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$
ΔI_{L1} , мА	2,1	1,4	1,3	1,1	1,0	0,95
ΔU_{C1} , В	0,33	0,21	0,185	0,17	0,16	0,095
ΔI_{L2} , А	2,27	1,51	1,25	1,08	1,0	0,93
ΔU_{C2} , В	0,23	0,151	0,125	0,108	0,1	0,093

В результате конвертор с МР выходного напряжения на базе не менее двух инверторов позволяет уменьшить пульсации на элементах фильтров в 1,5 раза, что повышает качество выходного напряжения и в целом ослабляет кондуктивные ЭМП в силовоточных цепях электропитания.

Заключение

Основные результаты

1. Предложена методика оценки восприимчивости транзисторов к воздействию ЭСР, отличающаяся учетом ёмкостей межсоединений транзистора на ПП. Отклонение результатов моделирования и эксперимента не превышает 2%, что позволяет использовать методику на этапе проектирования РЭУ для оценки восприимчивости к ЭСР транзисторов, расположенных на ПП.

2. Разработана аналитическая модель в замкнутой форме для вычисления токов и напряжений, наведенных на МПП в ТЕМ-камере при воздействии различных видов сигналов, имитируя воздействия излучаемой ЭМП. Модель проверена сравнением с результатами численного моделирования (24,9%) и эксперимента (25%), тем самым она может быть применена на начальном этапе проектирования для оценки амплитуды и формы наведенного на ИО тока при воздействии различных источников испытательных сигналов.

3. Предложена методика для анализа и локализации экстремумов напряжения при воздействии ЭСР на линию электропередачи. Создана модель СШЭП с проводными отводами, позволяющая анализировать амплитуду напряжения ЭСР вдоль СШЭП. Моделировалось воздействие ЭСР на СШЭП с различными поперечными сечениями основы: прямоугольным, коаксиальным и спиральным. Локализация максимума напряжения ЭСР показала, что в прямоугольной СШЭП он находится в проводных отводах на расстоянии 240–245 мм от начала шины, а в коаксиальной и спиральной смещается ближе к соединителям (200–205 мм). Методика позволяет повысить надежность СШЭП на этапе их проектирования.

4. Предложена модель конвертора с МР выходного напряжения, отличающаяся использованием не менее двух инверторов. Показано, МР позволяет уменьшить индуктивности и емкости входного и выходного фильтров, а также пульсации тока и напряжения на их элементах в 1,5 раза, что позволит

уменьшить массогабаритные показатели, повысить качество выходного напряжения и в целом обеспечить ослабление кондуктивных ЭМП.

Рекомендации

1. Методика оценки восприимчивости транзисторов к воздействию ЭСР рекомендуется использовать инженерам-разработчикам для прогнозирования пробоя транзистора на ПП при воздействии ЭСР с учётом реальных параметров их посадочных мест и слоя припоя, что позволит оптимально спроектировать ПП, выбрав погонные емкости печатных проводников, оптимальные типоразмеры корпусов, что обеспечит надежную работу РЭУ при ЭСР.

2. Модель взаимосвязи экранированной и микрополосковой линий передачи рекомендуется использовать на этапе проектирования РЭУ для оптимизации конструкции ПП и снижения уровня помех в чувствительных цепях.

3. Модель для локализации рекомендуется использовать для анализа распределения амплитуды напряжения ЭСР вдоль СШЭП с целью оптимизации её конструкции и минимизации риска пробоя диэлектрика.

4. Конвертор на базе двух инверторов рекомендуется использовать при разработке СЭП для РЭУ с повышенными требованиями к массе, габаритам и качеству электропитания, а также при разработке нового направления проектирования конверторов средней и большой мощности, обеспечивающего снижение параметров силовых элементов, меньшие пульсации потребляемого тока и лучшее качество выходного напряжения, по сравнению со схемами, выполненными с полностью регулируемым выходным напряжением. Использование конвертора на базе двух инверторов позволит уменьшить размеры и массу *LC*-фильтров и снизить уровень пульсаций тока и напряжения на выходе конвертора, что повысит качество выходного напряжения и в целом обеспечит ослабление кондуктивных ЭМП в цепях электропитания.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Разработать модели, учитывающие совокупное влияние температуры и влажности на параметры ЭСР и характеристики электронных компонентов.

2. Разработать программное обеспечение, реализующее предложенные модели и методы для автоматизированного анализа устойчивости к ЭСР.

3. Разработать методики для оптимального выбора и размещения элементов защиты от ЭСР в конкретных РЭУ с учетом их конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. **Дроздова А.А.** Воздействие электростатического разряда на транзистор с учётом ёмкости посадочного места / А.А. Дроздова, И.И. Николаев, М.Е. Комнатнов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 2. – С. 47–52.

2. **Дроздова А.А.** Влияние ёмкости посадочного места транзистора на его устойчивость к воздействию электростатического разряда / А.А. Дроздова, И.И. Николаев, М.Е. Комнатнов // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – № 1. – С. 1–21.

3. **Дроздова А.А.** Оценка уровня наведённого тока на испытуемый объект в TEM-камере / А.А. Дроздова, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 28–36.

4. **Дроздова А.А.** Модели и методы воздействия электростатического разряда, применяемые при моделировании, проектировании и испытаниях радиоэлектронных средств / А.А. Дроздова, М.Е. Комнатнов // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 44–70.

5. Авдзейко В.И. Расчет выходных фильтров систем электропитания с многозонным регулированием / В.И. Авдзейко, **А.А. Дроздова**, В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов // Электричество. – 2023. – №9. – С. 31–37.

6. Авдзейко В.И. Выявление перспективных способов преобразования параметров электрической энергии / В.И. Авдзейко, В.И. Карнышев, **А.А. Дроздова**, В.М. Рулевский // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №10. – С. 1–19.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

7. **Drozdova A.A.** Quasi-static analysis of susceptibility of the spacecraft power bus bar to the effects of electrostatic discharge / A.A. Drozdova, M.E. Komnatnov // Journal of physics: conference series (JPCS). – 2021. – P. 1–7.

8. **Drozdova A.A.** Evaluating the level of electromagnetic interference generated by the ESD source in the TEM-cell / A.A. Drozdova, M.E. Komnatnov // Int. sib. conf. on control and comm. (SIBCON). – Tomsk, Russia, 2022. – P. 1–7.

9. **Drozdova A.A.** Analyzing the capacitance coupling of electrodes with a solder layer on the transistor footprint / A.A. Drozdova, I.I. Nikolaev, M.E. Komnatnov // 24th Int. conf. of young prof. in elec. devices and materials (EDM). – Novosibirsk, Russia, 2023. – P. 300–303.

10. Nikolaev I.I. Spiral capacitor models that consider the capacitance and inductance of each turn / I.I. Nikolaev, **A.A. Drozdova**, M.E. Komnatnov // 24th Int. conf. of young prof. in elec. devices and materials (EDM). – Novosibirsk, Russia, 2023. – P. 1070–1074.

11. Tretyakov T.I. Software module for determining parameters of a bipolar transistor SPICE-model using static volt-ampere characteristics / T.I. Tretyakov, I.I. Nikolaev, **A.A. Drozdova** // 23th Int. conf. of young prof. in elec. devices and materials (EDM). – Novosibirsk, Russia, 2023. – P. 490–494.

12. Abramova K.N. Influence of conductor arrangement on different layers of the printed circuit board under its exposure to electrostatic discharge / K.N. Abramova, **A.A. Drozdova**, M.E. Komnatnov // Int. conf. on indus. engineering, applic. and manuf. (ICIEAM). – Sochi, Russia, 2024. – P. 331–336.

13. Tretyakov T.I. A Software designed to generate transistor models with interconnections / T.I. Tretyakov, I.I. Nikolaev, **A.A. Drozdova** // Int. conf. on indus. engineer., applic. and manuf. (ICIEAM). – Sochi, Russia, 2024. – P. 326–330.

14. **Drozdova A.A.** Closed-form model for calculating the current induced by the TEM-cell center conductor / A.A. Drozdova, M.E. Komnatnov // 25th Int. conf. of young prof. in elec. devices and materials (EDM). – Novosibirsk, Russia, 2024. – P. 420–423.

Доклады в трудах отечественных конференций

15. **Дроздова А.А.** Анализ амплитудно-частотных характеристик эквивалента сети / А.А. Дроздова, Н.В. Богданов, С.А. Тернов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – №1–2. – С. 286–288.
16. **Дроздова А.А.** Анализ восприимчивости силовой шины электропитания космического аппарата к воздействию электростатического разряда // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – №1. С. 243–247.
17. **Дроздова А.А.** Создание эквивалента сети для силовой шины электропитания по MIL-STD-461G // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – №1–1. – С. 239–243.
18. **Дроздова А.А.** Квазистатический анализ восприимчивости к воздействию электростатического разряда силовой шины электропитания космического аппарата / А.А. Дроздова, М.Е. Комнатнов // Материалы докладов Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 20–22 ноября 2020. – №1–1. – С. 270–274.
19. **Дроздова А.А.** Оценка восприимчивости силовой шины электропитания с разными поперечными сечениями к воздействию электростатического разряда // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2021. – №1–2. – С. 40–43.
20. **Дроздова А.А.** Моделирование воздействия электростатического разряда на транзистор с учётом ёмкости посадочного места / А.А. Дроздова, И.И. Николаев // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2022. – №1–1. – С. 198–201.
21. Николаев И.И. Паразитная ёмкость посадочного места с учётом припоя на электродах транзистора / И.И. Николаев, **А.А. Дроздова** // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2022. – №1–1. – С. 230–234.
22. Абрамова К.Н. Влияние расстояния между проводниками, расположенных на разных слоях печатной платы на матрицу ёмкостей / К.Н. Абрамова, **А.А. Дроздова**, Т.И. Третьяков // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2023. – №1–2. – С. 33–37.
23. Абрамова К.Н. Влияние расстояния между переходным отверстием и проводником на матрицу ёмкостей / К.Н. Абрамова, **А.А. Дроздова** // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2023. – №1–2. – С. 31–33.
24. Авдзейко В.И. Расчет выходных фильтров систем электропитания с многозонным регулированием / В.И. Авдзейко, **А.А. Дроздова** // 22-ая международная конференция «Авиация и космонавтика». – 2023. – С. 128–129.
25. Марков И. Анализ погонной ёмкости и массы проводов типа БС 35-1298 и МС 26-15 / И. Марков, **А.А. Дроздова** // Материалы докладов Межд. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР». – 2024. – №1–1. – С. 225–228.
26. Марков И. Анализ влияния геометрической формы Силовой шины электропитания при воздействии на неё электростатического разряда / И. Марков, **А.А. Дроздова** // Материалы докладов Межд. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР». – 2024. – №1–1. – С. 228–232.

Патенты

27. Патент на изобретение № RU 2749558 С1 Российская Федерация. Способ изготовления линии электропередачи со спиральным поперечным сечением и устройство на его основе / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, И.И. Николаев, А.В. Демаков, **А.А. Дроздова**. – Заявка №2020131977; заявлен 29.09.2020; опубликован 15.06.2021, Бюл. №1.

28. Патент на изобретение №2822924 Российская Федерация. Помехозащищенная силовая шина электропитания / Комнатнов М.Е., **Дроздова А.А.**, Николаев И.И., Газизов Т.Р. – Заявка №2024103349; заявлен 12.02.2024; опубликован 16.07.2024, Бюл. №20.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023667440. Вычисление электрических параметров силовой шины электропитания по заданной геометрической форме поперечного сечения её основания. Авторы: **Дроздова А.А.**, Семенюк В.А., Николаев И.И., Комнатнов М.Е. Заявка №2023666569. Дата поступления 09.08.2023 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.08.2023.