ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

| | УТВЕРЖДАЮ |
|-------------------------------|---|
| УДК 541.64: 537.3 | Проректор Национального |
| № госрегистрации: 01201256073 | исследовательского университета «Высшая |
| Инв. № | школа экономики», к.э.н. |

_М. М. Юдкевич

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ (окончательный)

ТЗ – 109 (Д.93056)

Руководитель темы: д.т.н., профессор Е.Д. Пожидаев

Оглавление

| СПИ | ІСОК І | ІСПОЛНИТЕЛЕЙ | 4 |
|--------------|---|--|--------------|
| РЕФ | EPAT | | 5 |
| BBE <i>I</i> | ДЕНИЕ _ | | 9 |
| 1 ЭЛЕН | ВЕДЕНИЕ Разработка методов проектирования высоконадежных электронных средств, стойких к рисктромагнитным воздействиям 18 СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ 21.1.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕРЕСТВ ЗАЩИТЫ 1.1.1 КОНЧЕПЦИЯ трежуровневой защиты аппаратуры от ЭСР 22.1.1.2 Конструкторноский уровень защиты 1.1.3 Схемотежнический уровень защиты 1.1.4 Конструкторносунициональный уровень защиты 1.1.5 Эффективность защиты аппаратуры конструкторскими методами 1.1.6 Эффективность защиты аппаратуры с помощью внешних схем защиты 1.1.7 Требования к встроенным средствам защиты от ЭСР интегральных микросхем 1.1.8 Выводы по разделу 1.1.7 Требования к воздействуе ЭСР 1.2.1 ЭСР и вариантые гое возникновения в ИС 1.2.2 Модель человеческого тела (Нитал Воду Model, НВМ) 1.2.4 Повреждение ИС ЭСР 1.2.5 Режимы тестпирования ЭСР в зовисимости от вариантов его возникновения на контоментых контоментых поизаком 1.2.6 Выводы по разделу 1.2.1 Выводы по разделу 1.2.2 Выводы по разделу 1.2.3 Разработка методики проведения жисперимента 1.2.4 Повреждение ИС ЭСР 1.2.5 Режимы тестпирования ЭСР в зовисимости от вариантов его возникновения на контоментых площаком 1.2.3 Модель межаниза (Масстримента 1.3.1 Определение актуальных параметров испытательного генератора 1.3.2 Модель межаниза (Масстримента 1.3.3 Микросхемы, используемые в эксперименте 1.3.4 Модельнования стенда, для тестнерования на ЭСР 1.4.1 Обоснование выбора програменного обеспечения 1.5.2 Создание развернутых моделей микросхем 1.5.3 Создание развернутых моделей микросхем 1.5.4 Цикл испытаний КР1554ТМ2 в программе Місгосар 1.5.5 Цикл испытаний КР1554ТМ2 в программе Місгосар 30.15.6 Цикл испытаний КР1554ТМ2 в программе Місгосар 31.16.0 Сорестве защиты интегральных микросхем от ЭСР 110.16.1 Базовые средства защиты интегральных микросхем от ЭСР 1111.16.2 Средства защиты интегральных микросхем от ЭСР 1111.16.2 Средства защиты интегральных микросхем от ЭСР | | |
| спи | | | |
| 1. | 1 Пос | ТАНОВКА ЗАДАЧИ НА МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ | 23 |
| | | Концепция трехуровневой защиты аппаратуры от ЭСР | _ 23 |
| | 1.1.2 | | _ |
| | 1.1.3 | | |
| | 1.1.4 | Структурно-функциональный уровень защиты | _ 33 |
| | 1.1.5 | | |
| | 1.1.6 | Эффективность защиты аппаратуры с помощью внешних схем защиты | _ 39 |
| | 1.1.7 | Требования к встроенным средствам защиты от ЭСР интегральных микросхем | _43 |
| | 1.1.8 | Выводы по разделу | _44 |
| 1. | 2 TECT | прование на воздействие ЭСР | _45 |
| | 1.2.1 | | |
| | | | _46 |
| | | | _47 |
| | | • | _47 |
| | _ | | |
| | | ктных площадках | |
| | | | _ |
| 1. | | | _ |
| | _ | | |
| | _ | Моделирование испытательного генератора | _ |
| | | | _ |
| | | Методика испытаний | |
| _ | | Верификация полученных данных | _61 |
| 1. | | | |
| | | | |
| 1 | | | _ |
| 1. | | | _ |
| | | | _ |
| | | | |
| | | | |
| | | | _ /3 _ on |
| | | , | |
| | | 200 | • |
| 1 | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | 1.6.4 | Режимы тестирования ИМС на ЭСР | |
| | 1.6.5 | | 126 |
| 1. | | | 130 |
| | 1.7.1 | Разработка модели схемы защиты от ЭСР с усредненными параметрами Spice-моделей | |
| | Опред | | 131 |
| | | | 135 |
| | 1.7.2 | | 138 |

| | 1.8 | Экспі | ЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ИСПЫТАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СХЕМЫ ЗАЩИТЫ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЕЕ | |
|---------|-------|-------------|---|------|
| | внеді | РЕНИЮ | | 139 |
| | 1. | 8.1 | | 139 |
| | 1. | 8.2 | | 142 |
| | 1. | 8.3 | | 150 |
| | 1. | 8.4 | Выводы по экспериментам. Рекомендации по внедрению модели и дискретной схемы | |
| | 30 | ащить | ol | 151 |
| | 1.9 | Заклі | ОЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ | _152 |
| κc | | | ОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ИХ АППАРАТОВ | 155 |
| ΝC | | | | - |
| | 2.1 | Осно 155 | ВНЫЕ КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРА: | ГОВ |
| | 2.2 | METO | ДЫ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ БРЭА KA | 165 |
| | 2.3 | METO | ДЫ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА НАДЕЖНОСТЬ БРЭА КА | 169 |
| | 2.4 | METO | рды учета влияния теплового режима на надежность БРЭА КА | 173 |
| | 2.5 | METO | ды учета влияния ионизирующих излучений космического пространства на надежность БРЭА КА _ | _177 |
| | 2.6 | METO | рдики расчета показателей надежности электронных модулей БРЭА КА | _178 |
| | 2. | 6.1 | Методика расчета безотказности электронных модулей БРЭА КА | 179 |
| | 2. | 6.2 | Методика расчета показателей долговечности электронных модулей БРЭА КА | 182 |
| | 2.7 | Выво | ДЫ ПО ГЛАВЕ | _189 |
| 3 пр | | - | ОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АСТЕКАНИЯ ТОКОВ ПО КОРПУСУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА | 190 |
| | - | | | _ |
| | | | ГРИЗАЦИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ | _190 |
| | | 1.1 | Общие проблемы электризации КА | 191 |
| | _ | 1.2 | • | 195 |
| | | 1.3 | , , | 196 |
| | | 1.4 | | 206 |
| | 3.2 | | РАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ПОЛИМЕРОВ ПОТОКАМИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ | |
| | | | DB | _208 |
| | | 2.1 | Введение | 208 |
| | | 2.2 | | 210 |
| | 3.3 | | ЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА РАСТЕКАНИЯ ТОКОВ ПО ЭЛЕМЕНТАМ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ | |
| | | | ТИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ | _218 |
| | 3.4 | | ЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСТЕКАНИЯ ТО | |
| | | | КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА | _224 |
| | 3.5 | Выво | ды по главе | _230 |
| 4 | 3/ | АКЛЮ | ЧЕНИЕ | _232 |
| лν | ITFP/ | ΔΤΥΡΔ | | 235 |

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

| Руководитель темы: | | Е.Д. Пожидаев (введение, |
|---|---------------|---|
| Профессор кафедры ФХиЭ МИЭМ НИУ ВШЭ, д-р техн. наук | подпись, дата | разделы 1.1.2, 1.1.8, 3.5, заключение) |
| Исполнители: | | |
| Профессор кафедры ФХиЭ МИЭМ НИУ ВШЭ, д-р техн. наук | подпись, дата | В.С. Саенко (главы 3) |
| Профессор кафедры ФХиЭ МИЭМ НИУ ВШЭ, канд. техн. наук | подпись, дата | А.Е. Абрамешин (глава 1, разделы 1.6.4, 1.6.5, глава 2 раздел 2.3, глава 3 раздел 3.1) |
| Профессор кафедры РТ МИЭМ НИУ ВШЭ, д-р техн. наук | подпись, дата | Л.Н. Кечиев (глава 1) |
| Доцент кафедры РТ МИЭМ НИУ ВШЭ, канд. техн. наук | подпись, дата | В.В. Жаднов (глава 2) |
| Профессор УИЛ ФБКА МИЭМ НИУ ВШЭ, д-р физ мат. наук | подпись, дата | А.П. Тютнев (глава 3, раздел 3.2) |
| Профессор кафедры РТ МИЭМ НИУ ВШЭ, д-р техн. наук | подпись, дата | С.У. Увайсов (глава 1, раздел 1.6.3) |
| Профессор кафедры ИТАС МИЭМ НИУ ВШЭ, д-р техн. наук | подпись, дата | Н.И. Борисов (глава 3, раздел 3.4) |
| Ст. преподаватель кафедры ИТАС МИЭМ НИУ ВШЭ, канд. техн. наук | подпись, дата | А.В. Востриков (глава 3, раздел 3.4) |
| Ст. преподаватель кафедры ИТАС МИЭМ НИУ ВШЭ, канд. техн. наук | подпись, дата | E.A. Ерохина (глава 1, раздел 1.6.2) |

РЕФЕРАТ

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД, КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ЗАЩИТА, БОРТОВАЯ РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА

Объектом исследования данной НИР являются космические аппараты и их бортовая радиоэлектронная аппаратура.

Цель выполнения НИР заключается в обеспечении функциональной безопасности радиоэлектронных средств космических систем и, в частности, космических аппаратов при воздействии мощных электромагнитных импульсов естественного и техногенного происхождения, что позволит увеличить срок активного существования создаваемых космических аппаратов до 10–15 лет и более.

Методы проведения работы. В связи с тем, что данная НИР носит комплексный характер использовались:

- методы и средства защиты электронных технических средств от воздействия электромагнитных излучений, в частности, от электростатических разрядов, а также связанные с ними методы электромагнитной совместимости,
- модели элементов и узлов бортовой аппаратуры, адекватно отражающие изменения характеристик устройств при наличии деструктивных воздействий,
- методы оценки надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов,
- методы макромоделирования для решения задач большой размерности и повышенной точности при определении величин силы тока в любой точке поверхности космического аппарата в процессе электростатического разряда.
- алгоритмы, методическое и математическое обеспечение программных средств расчета эффекта электромагнитных воздействий от источников электромагнитных помех, специфических для бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Полученные результаты. Развита теория проектирования электронных средств повышенной функциональной надежности, стойких к деструктивным электромагнитным воздействиям, в том числе в виде мощных электромагнитных импульсов, основанная на

разработанной методике моделирования воздействия электростатического разряда (ЭСР) на электронные средства. Разработана и исследована модель одного из базовых встроенных элементов защиты КМОП микросхем – GGNMOST. Определены параметры, которыми должна обладать встроенная схема защиты, чтобы обеспечить два уровня защиты – конструкторский и схемотехнический.

Даны рекомендации разработчику аппаратуры по построению обобщенной модели микросхемы со встроенной защитой. У конкретных микросхем с элементом защиты GGNMOST параметры этого элемента защиты могут отличаться. Поэтому сначала надо составить модель элемента защиты, соответствующую элементу защиты конкретной микросхемы. Для этого нужно получить ВАХ и АЧХ модели, аналогичные реальному элементу. Затем должен быть произведен выбор компромиссного решения по параметрам пассивных компонентов. После того, как модель элемента защиты составлена, в зависимости о топологии интегральной микросхемы, выходы схемы защиты соединяются с конкретными входами модели цифровой микросхемы. Полученная модель будет довольно точно отражать работу цифровой микросхемы со встроенной защитой.

Даны рекомендации по применению схемы защиты. Схема защиты должна защищать каждый вход цифровой микросхемы. Причем схема защиты должна располагаться как можно ближе к выводам микросхемы, которые схема защиты защищает. Лучше всего схему защиты использовать не виде отдельного устройства, а размещать во время проектирования платы участки печатного монтажа, где будет располагаться эта схема. Также она должна располагаться между микросхемой и интерфейсными выводами устройства, через которые может идти помеха. Так как схема защиты состоит из 6 компонентов, есть ограничения по размеру микросхем, которые она может защищать. Но, в любом случае, схема защиты должна иметь максимально плотную компоновку, иметь минимальную длину печатных проводников в схеме и занимать как можно меньше места на плате. При встроенном в плату исполнении можно использовать двусторонний монтаж, что даст наибольшую экономию места на плате.

Проведен анализ методов оценки надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (БРЭА КА) и возможность их применения с учетом особенностей схем расчета надежности БРЭА КА. Разработаны методы расчета электронных модулей БРЭА КА, позволяющие учитывать влияние ЭСР на их надежность. Разработаны методы имитационного моделирования БРЭА КА, позволяющие оценить показатели надежности структурно-сложной БРЭА и БРЭА с реконфигурируемой структурой, позволяющие в совокупности повысить точность и достоверность расчетной оценки надежности БРЭА КА.

разработки макромоделей и метода приближенного расчета В плане эквивалентных схем большой размерности для крупногабаритных космических аппаратов (КА) повышенной сложности предложен метод выделенных областей, в основе которого лежит проведение расчетов переходных токов лишь в локальной зоне схемы космического аппарата. Проведенные эксперименты в программе «Satellite-MIEM» показали, что область, в которой значения переходных токов в ветвях не больше величины в 1-2 % от величины электростатического разряда (ЭСР), представляет собой 400 узлов вокруг места ЭСР. Значения переходных токов в этих ветвях, не превышающие возникновения величины в 1-2 % от величины ЭСР, считаются незначительными, так как электромагнитные помехи от таких переходных токов оказывают слишком слабое влияние на бортовую радиоэлектронную аппаратуру КА. Это позволяет не учитывать величины переходных токов в указанных областях, построить ограниченную область расчета растекания токов и проводить ускоренные расчеты растекания токов от электростатического разряда по поверхности космического аппарата.

В проведенном исследовании решена задача ускоренного приближенного расчета эквивалентных схем плоскости. В дальнейших исследованиях планируется применять метод для расчетов растекания токов по поверхности КА, состоящего из более сложных геометрических элементов конструкции.

Предложен новый подход к макромоделированию эквивалентных схем большой размерности для крупногабаритных космических аппаратов повышенной сложности, базирующийся на явном и неявном численных методах Эйлера. Построена макромодель и получена новая вычислительная схема, в которой вычисляются только коэффициенты соответствующего вектора. Новая вычислительная схема позволяет на несколько порядков сократить вычислительные затраты на анализ СЭМ КА.

Предложен ряд этапов расчета на ЭВМ наводок во фрагментах бортовой кабельной сети космического аппарата с помощью построения макромоделей по предложенной вычислительной схеме с использованием методов Эйлера. Это преобразование файла схемы космического аппарата в матричный вид, формирование модели схемы в РОКБ, построение макромодели СЭМ КА на основе явного и неявного методов Эйлера, расчет вектора фазовых переменных по макромоделям, вывод вектора фазовых переменных, построение картины растекания токов по поверхности КА, и, наконец, вычисление величины наводки в кабеле на основе картины растекания токов и коэффициенте трансформации тока протекающего по элементу КА в напряжение наводки.

Область применения НИР: Космическая техника. Планируется внедрение разработанной структурно-электрофизической модели крупногабаритного космического аппарата повышенной сложности на предприятии ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Введение

Актуальность работы. В настоящее время основной проблемой отрасли космической техники отечественного производства, создающей телекоммуникационные, метеонавигационные, патрульно-дежурные, для нужд разведки и др. важные космические системы, является недостаточно длительные сроки эксплуатации входящих в них отдельных космических аппаратов (КА). Соответственно, главной задачей, поставленной Федеральным космическим агентством РФ, является доведении сроков активного существования (САС) создаваемых КА в ближайшее время до 10–15 лет и более.

САС КА факторов является воздействие на Одним из определяющих радиоэлектронные средства космических систем и, в частности, космических аппаратов, мощных электромагнитных импульсов естественного и техногенного происхождения. Так в процессе эксплуатации КА, находящихся на геостационарной и высокоэллиптических орбитах, в результате контакта с космической плазмой происходит значительная электризация (заряжение) поверхности КА, особенно во время и после геомагнитных бурь и суббурь. Разности потенциалов на поверхностях КА, находящихся на геостационарной орбите (ГСО), могут превышать 10 кВ. В результате возникают электростатические разряды (ЭСР) на поверхности блоков и кабельных систем. ЭСР являются источниками сильных электромагнитных помех (ЭМП), воздействующих на отдельные элементы и устройства и (или) бортовые системы в целом. Электромагнитные помехи, вызванные ЭСР, приводят к кратковременным сбоям и отказам бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА), искажению информационных сигналов и сигналов управления, а в отдельных случаях физическому повреждению бортовых устройств. Спутники различного назначения теряют управление, прекращают активное функционирование, временно выходят из строя. Многие спутники были потеряны. В любом случае их операторы несут многомиллионные потери. Признано, что в настоящее время отказы из-за электризации КА составляют 24 % от всех отказов.

В последнее десятилетие к проблеме ЭСР добавилась проблема обеспечения стойкости и функциональной безопасности аппаратуры КА в условиях мощных воздействий деструктивных естественного И техногенного характера. традиционных мощных электромагнитных воздействий в виде молний и высотного становиться все более актуальным преднамеренных ядерного взрыва, учет электромагнитных воздействий, которые являются новым фактором криминальных и террористических угроз безопасности, результатом применения оружия направленной энергии. Это объясняется новейшими достижениями в области генерации и излучения сверхмощных широкополосных электромагнитных полей, появлением угроз электромагнитного терроризма, повышением требований к защищенности ответственной информации, снижением чувствительности быстродействующих систем, наличием протяженных кабельных сетей на борту КА. Космический аппарат и его бортовая аппаратура могут испытывать подобные преднамеренные воздействия, как во время полета, так и во время транспортировки и предстартовой подготовки. Результаты исследований в ведущих странах мира показывают, что эту угрозу следует оценивать как долговременную, требующую принятия адекватных защитных мер. В противном случае неизбежно нарушение функциональной безопасности, преодоление порога стойкости электроники и выход ее из строя.

Цель выполнения научно-исследовательской работы. Цель выполнения НИР заключается в обеспечении функциональной безопасности радиоэлектронных средств космических систем и, в частности, космических аппаратов при воздействии мощных электромагнитных импульсов естественного и техногенного происхождения, что позволит увеличить срок активного существования создаваемых космических аппаратов до 10—15 лет и более.

Решаемые задачи. Обеспечение функциональной безопасности радиоэлектронных средств космических систем требует решения следующих задач, предусмотренных настоящей работой:

- Разработка структурной электрофизической модели космического аппарата для определения уровней электромагнитных помех на входах электронных блоков радиоэлектронных средств КА при ЭСР, отличающейся большой размерностью, в том числе
 - о создание новых эффективных методов формирования СЭМ КА на основе применения параметрических макромоделей и методов приближенного расчета эквивалентных схем большой размерности для крупногабаритных космических аппаратов (КА) повышенной сложности,
 - о развитие теории заряжения материалов космических аппаратов, учитывающей сток и перераспределения заряда за счет радиационной электропроводности полимерных материалов внешней поверхности КА,
 - Исследование и разработка методов и средств компьютерного моделирования процесса растекания токов по корпусу космического аппарата.
- Разработка методов и средств обеспечения функциональной безопасности радиоэлектронных средств космических систем при воздействии мощных

электромагнитных импульсов естественного и искусственного происхождения, в том числе

- разработка теории взаимодействия мощных электромагнитных импульсов естественного и искусственного происхождения с радиоэлектронными средствами,
- о развитие теории стойкости бортовых радиоэлектронных систем и теории высокочастотного и СВЧ электромагнитного экранирования,
- о создание методики экспериментальных исследований БРЭА на воздействие мощных электромагнитных импульсов,
- о создание и государственная регистрация программного обеспечения разрабатываемой структурной электрофизической модели расчетов неоднородных экранов и параметров керамических модулей бортовых радиоэлектронных систем.
- Развитие методов и средств оценки надежности наземно-космических радиотехнических систем при проектировании в условиях изменения надежностных показателей в результате воздействия на радиоэлектронные средства электромагнитных импульсов, в том числе
 - о разработка методов оценки надежности наземно-космических радиотехнических систем при проектировании.
 - разработка модели прогнозирования надежности радиолиний космических радиотехнических систем с учетом сформированной электромагнитной обстановки.
 - о разработка инженерных методик расчета показателей надежности наземнокосмических радиотехнических систем
 - о разработка инженерной методики расчета показателей надежности радиолинии связи космического аппарата с наземной станцией.

Краткий анализ состояния исследований в РФ и за рубежом в предметной области, сравнение с существующими аналогами, оценка новизны и перспективности реализации предлагаемых походов для достижения цели работы. Прошло более тридцати пяти лет с момента первого свидетельства о деструктивном влиянии электростатических разрядов (ЭСР) на функционирование геостационарных КА. Со временем проблема функционирования электронных средств КА, подверженных влиянию ЭСР, становилась все более актуально, поскольку стойкость микроэлектронной аппаратуры к электромагнитным возмущениям непрерывно снижается [29]. Несмотря на то, что физические процессы, происходящие при ЭСР, уже во многом исследованы, но

непрерывное совершенствование электронных средств КА не позволяет до запуска КА гарантировать, что спутник не будет подвержен зарядовым аномалиям, а аппаратура при этом будет функционировать в штатном режиме. Заряжение КА и воздействие ЭСР на аппаратуру КА это многоплановая проблема, на решение которой направлены усилия ученых и специалистов всего мира. Полетный опыт и анализ аномалий будут всегда необходимы для рекомендаций по проектированию КА.

Аномалии КА находятся в конце длинной цепочки причин и следствий. В некоторых областях околоземного космического пространства концентрация заряженных частиц такова, что эти частицы способны создавать абсолютный и дифференциальные потенциалы на поверхности или внутри КА вплоть до достижения напряжения пробоя. Заряды освобождаются, что возбуждает в кабелях импульсные электромагнитные помехи. Импульсы проникают в корпус и распространяются вдоль проводников печатных плат, достигая активных элементов, переключая триггеры, насыщая усилители, плавя дорожки внутри микросхем.

Как узнать, что происходит во время полета? Наземный командный пункт, предназначенный для космической системы, рекомендует номинальную конфигурацию КА. Сигнал тревоги или предупреждения дается, когда КА выходит из своего номинального рабочего состояния. Электростатический разряд никогда сам по себе не наблюдался, за исключением его постоянных последствий. Телеметрическая информация никогда не разрабатывалась для наблюдения непредвиденных ситуаций, она определена лишь для командной цели и для быстрого определения неисправности. Датчики внедряются исключительно на коммерческих КА для определения состояния окружающей среды в месте расположения КА во время аномалии.

Понимание электроразрядных явлений на КА это результат исследований в трех направлениях:

- анализ окружающей среды;
- испытания и моделирование процесса заряжения в вакууме, включая исследования радиационной электропроводности диэлектриков;
- моделирование и испытания аппаратуры на стойкость к электромагнитным воздействиям.

Научный коллектив МИЭМ НИУ ВШЭ работает над проблемой электризации КА более 30 лет с начала 1977 года, а в августе 1982 года был определен Решением ВПК СССР головной организацией по ряду пунктов указанной проблемы.

Работа над проблемой электризации КА проводится учеными МИЭМ НИУ ВШЭ на протяжении всего времени, в том числе и в последние пять лет по целому ряду направлений:

- фундаментальные исследования в области радиационной физики диэлектриков;
- структурное электрофизическое моделирование электризации КА;
- исследования электризуемости ранее созданных и вновь разработанных материалов космической техники;
- создание диэлектрических материалов обладающих повышенной стойкостью к эффектам электризации;
- разработка и развитие концепции нанопроводимости всех без исключения диэлектрических материалов КА, включая диэлектрики элементной базы бортовой радиоэлектронной аппаратуры;

Указанные исследования выполняются научным коллективом МИЭМ в рамках выполнения тематических планов НИР МИЭМ, грантов РФФИ и хоздоговорных НИР и ОКР с предприятиями космической отрасли: ФГУП ЦНИИМАШ, КБ "Салют", ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, КБ "Химмаш", НПП ВНИИЭМ, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и другими.

Коллектив МИЭМ имеет весьма существенный задел в научно-технической области, с которой связана тема данной НИР. В результате ее выполнения предполагается проведение работ по созданию и внедрению аппаратурного комплекса для проведения автономных испытаний, регистрации, обработки и хранения информации, получаемой на всех этапах проведения испытаний на подтверждение помехозащищенности бортовой аппаратуры от воздействия электростатических разрядов. В основе этих испытаний лежит действия электростатического разряда на радиоэлектронные средства космического аппарата. Имитация электромагнитного импульса [1], возникающего при электростатическом разряде, осуществляется с помощью испытательного генератора помех, экспериментальный образец которого уже разработан учеными МИЭМ НИУ ВШЭ. Кроме этого, необходимо разработать методику проведения испытаний воздействия ЭСР на радиоэлектронные системы с помощью генератора и скомпоновать все в единый комплекс, обеспечивающий не только сам акт испытания, но также обработку и хранение информации, получаемой на всех этапах. При этом основной задачей ставится подтверждение того, что бортовая радиоэлектронная аппаратура космического аппарата защищена от воздействия электростатических разрядов и возникающие электромагнитные помехи не вызовут сбоев в ее работе. Однако во многих случаев это не так. Поэтому необходимо проводить моделирование электромагнитной обстановки на поверхности космического аппарата в условиях протекания электростатических разрядов и затем пытаться оценить уровни возникающих помех на входах аппаратуры. В этом случае еще на этапе проектирования космического аппарата и его радиоэлектронных средств можно обеспечить их защиту от ЭСР методами электромагнитной совместимости (например, экранированием), или таким размещением бортовой кабельной сети на поверхности КА, которое уменьшает уровни электромагнитных помех [1].

Поэтому важнейшим этапом проводимой НИР является синтез структурной электрофизической модели растекания токов по корпусу КА при ЭСР, основанной на представлении конструкции КА в виде эквивалентной схемы из R, L и C элементов, позволяющей определять уровни электромагнитных помех на входах электронных блоков радиоэлектронных средств КА при ЭСР. Использование такой модели для конкретных аппаратов сложной конструкции, у которой число элементов достигает 10⁵, требует разработки новых эффективных методов компьютерного моделирования с применением параметрических макромоделей [31].

В последнее десятилетие к проблеме ЭСР добавилась проблема обеспечения стойкости и функциональной безопасности аппаратуры КА в условиях мощных деструктивных воздействий естественного И техногенного характера. традиционных мощных электромагнитных воздействий в виде молний и высотного взрыва, становиться все более актуальным учет преднамеренных электромагнитных воздействий, которые являются новым фактором криминальных и террористических угроз безопасности, результатом применения оружия направленной энергии [30]. Это объясняется новейшими достижениями в области генерации и излучения сверхмощных широкополосных электромагнитных полей, появлением угроз электромагнитного терроризма, повышением требований к защищенности ответственной информации, снижением чувствительности быстродействующих систем, наличием протяженных кабельных сетей на борту КА. Космический аппарат и его бортовая аппаратура могут испытывать подобные преднамеренные воздействия, как во время полета, так и во время транспортировки и предстартовой подготовки. Результаты исследований в ведущих странах мира показывают, что эту угрозу следует оценивать как долговременную, требующую принятия адекватных защитных мер. В противном случае неизбежно нарушение функциональной безопасности, преодоление порога стойкости электроники и выход ее из строя [32].

Требования по обеспечению стойкости аппаратуры к действию электромагнитных возмущений являются неотъемлемой частью проектов и конструкций бортовых радиоэлектронных средств (БРЭА) КА.

В настоящее время практически невозможно провести сравнение полученных в РФ научных и практических результатов в этой области с существующими аналогами в США и Европе. Ученые США перестали публиковать результаты своих исследований по вопросам моделирования электризации КА примерно с 1980 г. Последний обзор европейцев [30] датируется 2003 годом. В этом обзоре также отсутствуют разделы посвященные вопросам моделирования воздействия ЭСР на бортовую электронику КА. Это диктуется, прежде всего, конкуренцией, так как 25% всех отказов КА работающих на геостационарной и высокоэллиптических орбитах обусловлены именно поражающими факторами электризации КА.

В настоящее время отсутствуют методы разработки БРЭА КА, учитывающие воздействие всей совокупности дестабилизирующих электромагнитных воздействий на характеристики стойкости и функциональной безопасности электронной аппаратуры. Воздействия электромагнитных импульсов на радиоэлектронные средства космических систем могут изменять характеристики радиоэлектронных компонентов и поэтому их показатели надежности могут отличаться от показателей, полученных с помощью расчета стандартными методами.

В настоящее время созданием методов проектных исследований надёжности радиоэлектронной аппаратуры занят ряд российских учебных заведений и научных организаций, в том числе МИЭМ [33],«22 ЦНИИИ МО РФ», ОАО «СПИК «СЗМА», ВНИИ УП МПС РФ, ФГУ «З ЦНИИ МО РФ» и др. Как показывает анализ, в основе этих методов лежат аналитические модели, построенные с использованием теории однородных Марковских процессов. Сопоставление [34] их с методами, развиваемыми учеными ведущих зарубежных фирм, таких как Relex Software Corporation, BQR Reliability Ingineering Ltd., Reliasoft Corporation, A.L.D. Group, которые наряду с аналитическими методами используют методы имитационного моделирования, показывают, что здесь у нас есть определенное отставание.

Обычно методы имитационного моделирования в рамках расчётов показателей надёжности используются при «двоичной» оценки состояния РЭА - «работоспособное» - «не работоспособное». Однако, если требуется оценить не только вероятность безотказной работы, но и среднюю наработку, то это требует проведения дополнительных расчётов для численного интегрирования функции распределения. При этом инженеру

весьма трудно оценить число повторных расчётов, обеспечивающих приемлемую точность оценки средней наработки.

Указанная проблема может быть решена, если учесть специфику электронных модулей 1-го уровня и способов резервирования РЭА, состоящую в том, что практически любые «структуры произвольного вида» (схемы расчёта надёжности) могут быть представлены в виде иерархии ограниченного числа «типовых» резервированных групп. Это позволяет строить модели надёжности только для подмножества резервированных групп, что существенно сокращает пространство возможных состояний, и как следствие, число повторных расчётов.

Специфика резервирования РЭА позволяет находить эффективные алгоритмы для каждого типа резервированной группы и генерации модели отказов РЭА в целом. Отметим, что эффективное представление унифицированных топологических моделей составных частей и указанных алгоритмов применимо для широкого класса способов резервирования аппаратуры.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что выполнение рассматриваемой научноисследовательской работы позволит разработать методики оценки надежности, уровень которых будут превышать российский и будет соответствовать мировому уровню разработок в рассматриваемой области.

Таким образом, совокупность научных положений, научно-обоснованных рекомендаций, технических решений, полученные в результате выполнения НИР, отличаются новизной, соответствуют мировым тенденциям развития космической отрасли и космического приборостроения, обеспечивают приоритетный уровень отечественной науки. Выполнение НИР придаст дальнейшее развитие научной школе, работающей в МИЭМ НИУ ВШЭ, будет способствовать подготовке кадров высшей квалификации – кандидатов и докторов наук.

Настоящая НИР послужит одной из важнейших составляющих в задаче повышения конкурентоспособности отечественных изделий космической техники и обороноспособности страны. Внедрение результатов проекта в отрасли наряду с другими мероприятиями позволит довести гарантированный срок службы КА на орбите до 10–15 лет, повысит стойкость аппаратуры в экстремальных условиях, что значительно повысит зарубежный спрос на изделия космической техники, выпускаемые в РФ.

Научная значимость работы. Решение задач по обеспечению функциональной безопасности радиоэлектронных средств космических систем, предусмотренных в данной работе, носит комплексный характер, передовой для нашей страны научно-технический уровень, и вносит вклад в развитие отдельных научных дисциплин:

- 1. Разрабатываемые на основе применения параметрических макромоделей новые эффективные методы формирования структурной электрофизической модели КА, отличающейся большой размерностью, имеют существенную научную значимость для компьютерного моделирования.
- 2. Разрабатываемые в результате исследования радиационной электропроводности полимеров критерии подбора перспективных материалов внешней поверхности КА имеют существенную научную значимость для космического материаловедения.
- 3. Создаваемая структурная электрофизическая модель растекания токов по корпусу КА при ЭСР и методика расчета электромагнитных помех, возникающих на входах бортовой радиоэлектронной аппаратуры КА при воздействии ЭСР имеет существенную научную значимость для теории и практики проектирования радиоэлектронных средств космических систем.
- 4. Разрабатываемые методы количественной оценки стойкости БРЭА и эффективности защиты неоднородными электромагнитными экранами важна для развития *теории* электромагнитной совместимости.
- 5. Разрабатываемые модели прогнозирования надежности радиолиний космических радиотехнических систем, разработанные в результате выполнения работы, внесут существенный вклад в *теорию надежности радиотехнических систем*.

1 Разработка методов проектирования высоконадежных электронных средств, стойких к электромагнитным воздействиям

Современная космическая аппаратура построена на интегральных микросхемах различного уровня интеграции. Характерной особенностью таких устройств является быстродействия, снижение рабочего повышение напряжения компонентов потребляемой мощности. Данное направление развития обеспечивает снижение стоимости производства электронных компонентов, в первую очередь микросхем, позволяет экономить электроэнергию, позволяет повысить тактовые частоты работы электронных компонентов, причем до недавнего времени, повышение шло экстенсивным путем – снижение энергопотребления, за счет утончения техпроцесса и снижения нормального рабочего напряжения, позволяло выставить более высокие частоты тактового генератора. Такой подход является экономически и технологически весьма эффективным, но на данный момент, для того чтобы закон Мура остался актуальным, этого стало явно недостаточно. Наступил момент, когда пришлось делать принципиально новую схему доставки опорного сигнала в кристалле. Инициатором выступила компания AMD, предложившая использовать классическую древовидную структуру распространения сигнала, а резонансную сеть (Resonant Clock Mesh), которая позволяет не рассеивать полученную кристаллом энергию, а использовать ee процессе функционирования. Со стороны Intel была так же представлена принципиально новая технология «Tri-Gate», суть которой в использовании трехмерных транзисторов, что должно позволить существенно снизить электрические потери в кристалле. В тоже время, чрезвычайно утончился техпроцесс – передовые предприятия на данный момент освоили массовый выпуск чипов по технологическим нормам 28 нм и 22 нм и находятся в стадии подготовки производственных линий для норм 20 нм. На фоне данных тенденций особенно остро встает вопрос о помехоустойчивости выпускаемых микросхем. Ведь снижение напряжения питания существенно повышает чувствительность микросхем к помехам, а утоньшение техпроцесса делает интегральные элементы более подверженными тепловому и электрическому пробою. Если в целом вопросы электромагнитной совместимости можно решить на этапе проектирования печатных плат, то вопрос с устойчивостью к электростатическим разрядам (ЭСР) остается открытым [1].

Микросхемы значительную часть производственного цикла проводят вне плат, в составе которых будут функционировать впоследствии, а некоторые – например,

центральные процессоры, оперативная память, остаются без защиты платы вплоть до поступления к конечному пользователю и, соответственно, установки в штатные места. Так всегда остается актуален вопрос взаимодействия с окружением, в том числе с телом человека, во время функционирования приборов, что, в большинстве случаев, неизбежно. Поэтому необходимо проведения моделирования работы микросхем в условиях воздействия ЭСР.

Повышение быстродействия вычислительной техники, миниатюризация элементной базы привели к появлению многих электрических устройств, уровни сигналов в которых измеряются в микроамперах и микровольтах и ниже, а частоты сигналов могут достигать гигагерц. При таких частотах резко возросли излучения электромагнитных полей обычных проводников во внешнее пространство и, как результат, наведение помех в соседних электрических элементах, соизмеримых с полезными сигналами. Это оказывает негативное воздействие на работоспособность близко расположенных технических средств.

Также в реальных условиях эксплуатации аппаратуры на неё могут воздействовать различные виды электромагнитных помех (ЭМП), создаваемые электромагнитными импульсами (ЭМИ) как естественного происхождения, так и искусственного. Естественные электромагнитные импульсы возникают при мощных грозовых разрядах. Искусственные – при излучении передающих устройств, за счёт влияния станций связи, высоковольтных линий передач, а также за счёт внутренних переходных процессов в аппаратуре при её функционировании. Воздействие электромагнитных импульсов на изделия электронной техники приводит к изменению их параметров или выхода их из строя как за счёт непосредственного поглощения ими энергии, так и за счёт воздействия на них наведённых в цепях импульсов токов и напряжений [2].

Наиболее часто необратимые отказы космической аппаратуры вызывает такое явление, как ЭСР. Электростатический разряд возникает при освобождении заряда накопленного при трении. Заряд может достигать десятков тысяч вольт. Такой разряд выводит из строя интегральные микросхемы, которые год от года становятся все меньше по топологическим размерам и становятся все восприимчивей к перенапряжениям. Наибольшее развитие сейчас получили микросхемы, выполненные по КМОП технологии. Они имеют ряд преимуществ – симметричные пороги переключения в логические уровни, нефиксированное напряжение питания, совместимость с ТТЛ уровнями, высокое быстродействие из-за уменьшения толщины подзатворного окисла. Но именно эти микросхемы наиболее восприимчивы к электростатическому разряду – структура затвороксид-подложка представляет собой конденсатор с очень тонким диэлектриком, который

легко пробивается при перенапряжении. Отсюда возникает необходимость защиты цифровых микросхем от ЭСР. Причем схемотехническая защита аппаратуры применяется на всех уровнях — микросхемы имеют встроенную защиту, но наряду с ней в аппаратуре применяются дискретные схемы защиты от перенапряжений. Только такой подход позволяет защитить цифровые микросхемы от необратимых отказов.

При разработке аппаратуры, работающей в заданной электромагнитной обстановке трудно оценить поведение элементной базы и устройств в целом при воздействии дестабилизирующих факторов. Для этого нужно проводить натурные испытания опытных образцов. Но экономически намного целесообразней проводить моделирование таких воздействий, как ЭСР, и уже на этапе проектирования аппаратуры вводить необходимые внешние средства защиты. В программах схемотехнического моделирования модели цифровых микросхем не имеют описания встроенных в них средств защиты от высоковольтных перенапряжений. Поэтому для моделирования воздействия ЭСР необходимо создать такие модели встроенных средств защиты. Модели этих средств защиты, включенные в модели некоторых микросхем, позволят проводить виртуальные эксперименты по воздействию ЭСР на элементную базу и на аппаратуру, в которой она применяется.

При выполнении работы преследовались следующие цели:

- Установить возможность проведения моделирования сигнала, характерного для ЭСР, в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.2-99 (как основным) и MIL-STD-833 (как дополнительным).
- Установить корректность работы элементов, содержащихся в стандартных библиотеках, при моделировании воздействия ЭСР.
- Провести попытку моделирования, результаты которого будут максимально близкими к реальному эксперименту.
- Разработка и исследование модели одного из базовых встроенных элементов защиты КМОП микросхем на МОП-транзисторе: *n*-МОП транзисторе с заземлённым затвором (Grounded Gate NMOS Transistor, GGNMOST).

Для достижения поставленных целей были поставлены и решены следующие задачи:

- Изучение воздействия электростатического разряда на электронную технику;
- Изучение методики проведения испытаний на устойчивость к ЭСР;
- Обобщение теоретических данных по ЭСР, необходимых для проведения эксперимента;

- Анализ сведений о проведении моделирования воздействия ЭСР с использованием персонального компьютера;
- Выбор программных средств для проведения моделирования;
- Проведение двух циклов испытаний, по одному для каждого программного комплекса;
- Анализ современных подходов к защите от электромагнитных помех, и от электростатического разряда в частности. Провести обзор внешней и встроенной схемотехнической защиты от ЭСР;
- Разработка модели элемента защиты GGNMOST, исследование зависимости статических и динамических характеристик модели от ее параметров;
- Разработать схему защиты на дискретных элементах, функционально соответствующую элементу встроенной защиты и провести ее моделирование;
- Провести натурные испытания разработанной схемы защиты на дискретных элементах. Снять статические и динамические характеристики схемы.
- Проанализировать по результатам эксперимента адекватность разработанной модели для моделирования воздействия ЭСР. Дать рекомендации по внедрению разработанной схемы защиты и рекомендации по применению модели схемы защиты.

Список основных используемых сокращений

ИГ – испытательный генератор

ИС – интегральные схемы

ИМС – интегральная микросхема

КА – космический аппарат

КМОП – комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник (англ.

CMOS)

РЭА – радиоэлектронная аппаратура

ТТЛШ – транзистор-транзисторная логика с диодами Шоттки

ТС – техническое средство

ЭМИ – электромагнитный импульс

ЭМП – электромагнитная помеха

ЭМС – электромагнитная совместимость

ЭС – электронное средство

ЭСР – электростатический разряд

1.1 Постановка задачи на моделирование средств защиты

1.1.1 Концепция трехуровневой защиты аппаратуры от ЭСР

Промышленные эксперты оценивают потери из-за действия статического электричества на электронную аппаратуру и его компоненты от 8 до 33 %. Порой достаточно одного электростатического разряда для того, чтобы вывести из строя сложнейший электронный прибор или уничтожить базу данных крупной организации. Опасность воздействия ЭСР на оборудование существует на всем жизненном цикле электронных средств.

Электростатический разряд возникает при накапливании больших зарядов на поверхностях материалов. Чаще всего эти заряды сами по себе постепенно разряжаются и их присутствие остается незаметным. Но при определенных условиях заряд в оставаться длительное время диэлектриках может или даже увеличиваться (накапливаться). Если в материале космического аппарата (КА) происходит накопление статического электричества, а стекание заряда, обусловленное релаксационными процессами, не предотвращает накопление заряда, то напряженность электрического поля, создаваемого статическим зарядом, будет увеличиваться. Когда напряженность достигнет критического значения (E_{nn}) , произойдет пробой диэлектрика (пробой диэлектрика конденсатора или пробой воздушного пространства, например, между обшивкой КА и кабелем). В результате электростатического разряда возникает кратковременный электрический импульс, протекающий в искровом промежутке. Он вызывает ток разряда в проводниках, амплитуда которого изменяется во времени, как показано на Рис. 0.1. В свою очередь разрядный ток генерирует переменное электромагнитное поле [1, 22].

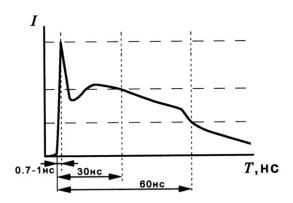


Рис. 0.1. Кратковременный переменный по амплитуде электромагнитный импульс тока при ЭСР

Если вблизи разряда находится проводящий контур, то это переменное поле в результате электромагнитной индукции наводит в контуре электрический ток. Из закона электромагнитной индукции следует, что ЭДС, наведенная электромагнитным полем, возникающем при электростатическом разряде, имеет наибольшие значения в моменты крутого нарастания и спада амплитуды электромагнитного импульса.

Для подавления таких переходных процессов, как ЭСР, в аппаратуре необходимо применять систему защиты. Далее описывается общая концепция защиты аппаратуры от ЭМП, определяется эффективность защиты от ЭСР конструкторскими и схемотехническими методами. На основании полученных данных об эффективности внешних средств защиты формулируются требования к встроенным средствам защиты интегральных микросхем. Выполняя эти требования, разрабатываемая аппаратура при наличии внешней защиты сможет работать без необратимых отказов при воздействии ЭСР и других электромагнитных помех. Эти требования являются исходными данными для разработки модели встроенного средства защиты ИМС от ЭСР.

На начальной стадии проектирования аппаратуры, разработки облика системы методы защиты от ЭМП просты, недорогие и не требуют больших затрат. Когда объект создан, а требования по защите не выполнены, то затраты на защиту могут достигать 20 % от стоимости разработки образца.

На практике разработчиками технических средств не всегда своевременно принимаются меры к обеспечению их стойкости в заданной (в общем случае непрогнозируемой) электромагнитной обстановке. Отсутствие системного подхода к решению вопросов ЭМС и стойкости РЭС может привести к отрицательным результатам и значительным дополнительным затратам времени и средств по доработке аппаратуры. Понятие «системный» в данном случае применено потому, что защита технических средств должна строиться на основе их анализа как системы.

В самой элементарной форме проблема защиты от воздействия электромагнитных помех, в том числе от ЭСР, состоит в подавлении возмущения в источнике помех (при наличии такой возможности), повышении стойкости рецептора помех, и/или воспрепятствовании воздействия источника помех на объект через среду распространения электромагнитной энергии. Когда источник неуправляем (например, молния, передатчики и т.д.), то основным путем решения задачи защиты РЭА становиться управление свойствами рецептора или изменения свойств среды распространения электромагнитной энергии.

Таким образом, защита технических средств (TC) от воздействия электромагнитных импульсов и ЭСР организуется по ступенчатому принципу. Сначала

обеспечивается грубая защита, снижающая уровень напряжений разрушающих воздействий в цепях ТС до приемлемых значений (применение экранирования, замена проводных линий передачи волоконно-оптическими, установка ограничителей перенапряжений). Дальнейшее снижение уровня помех осуществляется с помощью фильтров и корректирующих цепей, которые кроме защитных функций выполняют и другие. Так, например, для защиты входных цепей полупроводниковых усилителей применяют высокочастотные диоды, соединенные по различным схемам. Они имеют напряжение ограничения в пределах единиц и долей вольта и являются практически безынерционными. Первые 2 ступени предотвращают выход из строя аппаратуры, но не гарантируют ее правильное функционирование при воздействии разрушающих факторов. Предотвратить сбои аппаратуры позволяет структурно-функциональная защита, при которой изменяются функциональные принципы построения ТС, а также изменяется структура используемых сигналов. Только при таком системном подходе можно обеспечить высокое качество функционирования ТС в условиях воздействия ЭМП. Наиболее распространенные методы трех уровней защиты приведены на Рис. 0.2.



Рис. 0.2. Три уровня защиты аппаратуры от помех

Использование в конкретных ТС тех или иных мер защиты в значительной степени зависит от допустимых уровней помех в их цепях: чем выше этот уровень, тем меньшая степень защиты и меньшие затраты на ее реализацию. Так как допустимые уровни помех обычно известны (должны определяться на стадии эскизного проектирования и

уточняться на последующих этапах разработки TC), то меры защиты выбирают компромиссными, исходя из технико-экономического сравнения различных вариантов защиты и анализа работы TC как системы.

Различают два механизма проникновения помех: за счет излучения и за счет кондуктивного проникновения помехи через барьер (Рис. 0.3).

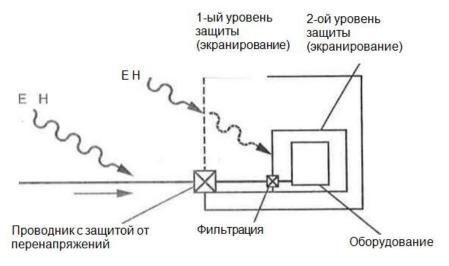


Рис. 0.3. Пример проникновения излученных и кондуктивных помех через 2 уровня защиты

Этот рисунок показывает пример ТС, защищенного двумя уровнями защиты. Поле ЭМИ может быть уменьшено металлическими экранами, установленными специально для этих целей. Защита против помех, проникающих через входящие и исходящие интерфейсы, может быть достигнута за счет ограничения по амплитуде путем короткого замыкания пути проникновения помех на экран (устройства защиты от перенапряжений), с помощью ограничения по диапазону рабочих частот (фильтров) или комбинацией обоих методов защиты (например, устройства защиты от перенапряжений плюс фильтры).

1.1.2 Конструкторский уровень защиты

Конструкторские методы защиты включают: экранирование (экранирующие корпуса, средства повышения эффективности экранирования, защита отверстий и кабельных вводов и т.п.), зонирование, рациональное заземление [1, 2].

Одним из общих подходов защиты состоит в установке некоторого электромагнитного барьера между источником и рецептором помех. Для источников вне системы барьер может применяться на уровне систем. Для источников внутри системы, электромагнитная совместимость требует два барьера: один около источника, чтобы управлять эмиссией, и один в рецепторе, чтобы управлять восприимчивостью. Эта концепция проиллюстрирована на Рис. 0.4.

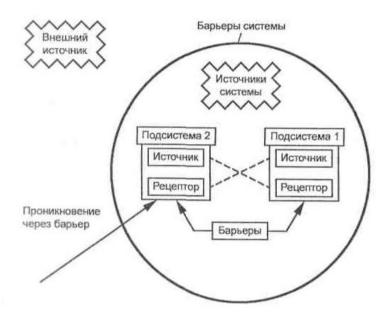


Рис. 0.4. Топология системных барьеров

Барьеры на пути распространения электромагнитных волн реализуются в виде экранов, которые используются для уменьшения возмущающих электромагнитных колебаний от внешних источников на внутренние цепи электроники и, наоборот, ограничивают помехоэмиссию от внутренних цепей до уровней, заданных требованиями ЭМС для данного типа оборудования. Экраны должны обладать целостностью, поскольку любая неоднородность в виде, например, какой-либо апертуры приведет к нарушению однородности и нарушению управления ситуацией.

Очевидным методом защиты ТС от воздействия ЭМИ является так называемый режим общей изоляции. Этот режим подразумевает отключение всех внешних связей от экранированного объема, в котором размещены ТС. Указанный метод, приемлемый для защиты многих видов аппаратуры (передвижные РЛС, аппаратура связи и управления, используемая на самолетах, и т.п.), оказывается непригодным для большинства стационарных объектов.

Экраны должны не только снижать уровень излучаемых электромагнитных полей, но не должны переизлучать электромагнитные поля за счет наведенных на экране токов. Это серьезная проблема обеспечения целостности экранирования. Металлические экраны могут внести свой вклад в коэффициент ослабления поля, если они должным образом объединены согласно концепции мультиэкрана. Оптимальное использование этих конструкций может быть сделано только в том случае, если каждый экран пространственно отделен друг от друга и проникающие линии интерфейсов (шины данных, заземление, питание) входят в экраны только в одной точке. Только в этом случае

защитные устройства препятствуют проникновению внутрь защищенных зон и выходу из них токов помех.

В неудачно спроектированном экране с многочисленными точками входа, индуктивные напряжения, вызванные токами, протекающими по экрану, могут попасть в защищенную зону и таким образом обойти защитные устройства. Многочисленные точки заземления в таком экране увеличивают амплитуду синфазной помехи, проникающей от области излучения к устройству. Поэтому выгодно иметь единственную точку ввода для всех кабелей. Это означает, что все защитные меры против проникновения токов помех через кабели должны быть расположены на экране настолько близко друг к другу, насколько это возможно. Это также означает, что потенциал земли для всего оборудования в пределах защищенной зоны должен быть взят исключительно от единственной точки входа.

Два фундаментальных понятия топологии монтажа между точкой входа и внутренним оборудованием показаны на Рис. 0.5.

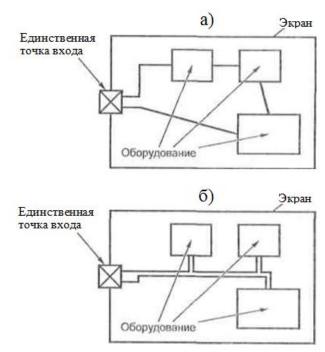


Рис. 0.5. Концепция топологии монтажа: а — в виде замкнутого контура, б — в виде дерева

При топологии в виде замкнутого контура (Рис. 0.5,*a*) соединения внутри экрана могут быть выполнены произвольно. Проникающее поле индуцирует напряжение и токи в монтажных контурах. Эти напряжения могут оказать влияние на работу ТС. Поэтому эта топология должна использоваться только при высокой эффективности экранирования, которая обеспечивает низкую напряженность поля в экранированной зоне. Следует

отметить, что наличие многочисленных контуров внутри экранированной зоны может привести к взаимным помехам между оборудованием, установленным в этой зоне.

Топология монтажа в виде дерева (Рис. 0.5,6) содержит контуры с очень малой площадью и близким расположением прямого и возвратного пути тока. В этом случае проникающее поле может индуцировать только синфазные сигналы, к которому система менее восприимчива (сигналы на линиях и на рабочем заземлении имеют одинаковые амплитуду и фазу). Эта топология монтажа предпочтительна для зон с относительно низкой эффективностью экранирования. Если используются высококачественные экранированные кабели и/или металлические кабелепроводы, требования для значения эффективности экранирования могут быть дополнительно уменьшены.

В пространственно распределенном устройстве КА могут быть определены области защиты различных уровней. Одним из критериев определения таких областей и степеней их защиты может быть деление ТС на ответственные части аппаратуры, которые не должны быть защищены, или разделение частей ТС по степени их восприимчивости. Эта процедура называется зонированием. Правильное зонирование подразумевает, что примененная защита от помех достаточна, чтобы сделать остаточную кондуктивную помеху сопоставимой излученной помехе в пределах данной области, так, чтобы в пределах области не происходило доминирование помех над уровнем помех в цепи питания. Классификация зон может быть выполнена только путем сравнения чувствительности данного оборудования к каждому виду помехи.

Если используются экранированные кабели или каналы для прокладки экранированного кабеля, то все экраны должны быть связаны между собой при любой конфигурации топологии. Корпус оборудования должен также быть подключен к экранам кабелей. Понятие целостности экранирования включает применение соединителей хорошего качества для точек ввода кабелей в оборудование и устранения из практики соединений оплеток кабелей в виде «косичек» и других подобных вариантов, которые неэффективны с точки зрения ЭМС.

Заземление корпусов в виде проволочных соединений обладают повышенным значением полного сопротивления и могут обеспечить только электробезопасность для персонала. Функциональное заземление должно конструктивно выполняться таким образом, чтобы его полное сопротивление на максимальной рабочей частоте или частоте электромагнитного воздействия было минимальным (доли ома).

При разработке печатных плат с учетом экранирования, зонирования и заземления нужно использовать следующие конструкторские приемы:

• по возможности сближать шины питания и заземления;

- минимизировать длину проводников;
- избегать сетчатых рисунков для слоев питания и земли;
- избегать разделения проводника на ряд параллельных проводников;
- формировать линии связи как совокупность прямого и обратного проводников;

1.1.3 Схемотехнический уровень защиты

Схемотехнические методы защиты заключаются в целенаправленном изменении структуры принципиальных электрических схем или введении в них дополнительных элементов для ослабления влияния ЭМИ, распространяющихся кондуктивным путем, на нормальное функционирование ТС. Причем применяемые устройства защиты используются как для ослабления кондуктивных электромагнитных возмущений от окружающей среды в цепи внутренней (относительно экрана) области, и наоборот, ограничивают кондуктивную помехоэмиссию от внутренних источников помех в окружающую среду. Это предполагает, что необходимо применять двунаправленные устройства защиты [3–9].

Основным требованием, предъявляемым к защитному элементу, является обеспечение его минимального влияния на работу защищаемой цепи (устройства, аппаратуры) при отсутствии ЭМИ. Это особенно важно для широкополосных устройств и цифровых систем повышенного быстродействия. Вносимые средствами защиты электрические параметры, в том числе «паразитные», не должны искажать технические показатели работоспособности технических средств, например быстродействие. Резюмируя сказанное, можно выделить три основных требования, предъявляемых к средству защиты:

- обеспечение минимального влияния на работу защищаемой цепи при отсутствии ЭМИ;
- реакция на высокую скорость нарастания тока и напряжения;
- соответствующие статистические и динамические характеристики, а также достаточная токовая пропускная способность.

Классификация устройств защиты дана в Таблица 0.1.

Различие в работе между группой приборов, работающих на принципе пробоя и ограничителей напряжения, заключается в том, что в первом случае после достижения напряжения на приборе некоторого уровня пробоя напряжение на нем падает до уровня поддержания искрового разряда (например, для газозразрядных трубок). Ограничители напряжения удерживают напряжение на уровне стабилизации. Это иллюстрируется на рис. 1.6.

Таблица 0.1

Основные устройства и компоненты защиты от кондуктивных помех

| Принцип действия | Тип устройства или компонента |
|------------------------------------|--|
| Пробойное снижение напряжения | Газоразрядные трубки |
| | Искровые разрядники |
| | Плавкие ограничители |
| | Ограничители на основе нелинейного сопротивления |
| | Ограничители электробезопасности для |
| | мобильной аппаратуры (для постоянного |
| | тока, напряжение более 400 В) |
| Ограничение напряжения | Метало-оксидные варисторы |
| | Защитные лавинные диоды (полупроводниковый |
| | стабилитрон с лавинным пробоем) |
| Ограничение частотного спектра | Фильтры |
| | Защитные цепи |
| Гальваническая развязка | Оптические устройства |
| | Развязывающие трансформаторы |
| Комбинированные методы | Защитные цепи |
| | Ограничители электробезопасности |
| Высокочастотные коаксиальные линии | Шлейфовые линии Резонаторы |

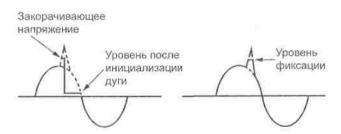


Рис. 0.6. Ограничение напряжения разрядниками (слева) и стабилизаторами

В целом устройства защиты от перенапряжений — сугубо нелинейные элементы. При определенном напряжении их сопротивление находится в диапазоне мегом, но под воздействием помехи сопротивление резко падает до единиц и долей ома. Поэтому их эффективность не может быть выражена в децибелах или непосредственно сравнена.

При воздействии импульсных возмущающих напряжений защитные устройства специфицируются на определенные параметры тестовых воздействий. Так, газоразрядные приборы должны обеспечивать возникновение разряда при изменении напряжения со скоростью 100 B/mkc или ниже. В большинстве случаев выбор конкретной схемы защиты и компонентов является компромиссом, поскольку нет универсальных защитных устройств. Такие параметры, как «время срабатывания» или «время задержки», зависят от скорости изменения напряжения dv/dt и тока di/dt, которые в свою очередь зависят от параметров (индуктивности и емкости) корпуса и выводов компонентов, а также от их монтажа.

Защитные свойства при импульсных воздействиях проявляются по-разному в зависимости от параметров импульсов, их числа и периода следования. Одиночные защитные компоненты могут тестироваться на наиболее критичные случаи dv/dt и di/dt. В них нет суперпозиции остаточного напряжения от комбинации различных воздействий. В комбинированных схемах, в которых применяются в качестве вторичного элемента защиты фильтры, имеется эффект интегрирования результатов различных воздействий на остаточное напряжение. В худшем случае это напряжение не должно превышать допустимого.

Потери, вызванные фильтрами, установленными в линии, и коэффициент ослабления экрана также описывают два различных эффекта. Однако следует отметить, что, когда остаточное напряжение (или энергия) кондуктивной помехи на линии в защищенной зоне сопоставимо с напряжением (или энергией), которое может быть индуцировано на линии полем, проникающим через экран, дальнейшее уменьшение напряжения (или энергия) кондуктивной помехи все еще целесообразно.

При оценке защитных свойств схем защиты при воздействии ЭМИ следует учитывать, что их поведение в реальной конструкции будет отличаться от результатов тестирования. Для импульсов с короткими фронтами основное влияние оказывает индуктивность выводов и монтажа защитного компонента, на которых падает напряжение пропорционально индуктивности и скорости изменения тока, протекающего по этим элементам. Для элементов защиты, построенных по принципу пробойного снижения напряжения, например, газоразрядные трубки, возможно даже увеличение dv/dt и di/dt, что в свою очередь приведет к увеличению остаточного напряжения при некорректно спроектированной вторичной защите в комбинированных схемах. При проектировании комбинированных схем защиты внимание следует уделять развязке между первичными и вторичными элементами защиты при всех возможных вариантах помеховых воздействий.

Плавкие ограничители не рекомендуется для применения при защите от ЭМИ.

Ограничитель на основе нелинейного сопротивления применяется для цепей постоянного тока и имеет одни или несколько искровых разрядников, соединенных последовательно с одним или несколькими нелинейными резисторами. Для защиты от мощного ЭМИ максимальная скорость изменения напряжения, при которой контролируется напряжение зажигания, составляет 100 кВ/мкс и 1 кВ/нс.

Лавинные диоды применяются только в параллельном соединении для уменьшения суммарной емкости. Для применений в области защиты от ЭМИ оговаривается максимальная пиковая мощность для пикового тока импульса определенной формы длительностью 100 не. Максимальное напряжение на компоненте определяется при

пиковом токе импульса 8/20 мкс. Быстродействие лавинных диодов достаточно высокое; они переходят в проводящее состояние за единицы наносекунд. Однако это быстродействие в реальной ситуации снижается за счет влияния индуктивных параметров конструкции диода из-за высокой скорости изменения тока. Остаточное напряжение на диоде есть сумма его собственного напряжения ограничения и падения напряжения на индуктивностях выводов.

Во всех случаях, когда падение напряжения на индуктивных элементах корпусов и выводов защитных компонентов зависит от скорости изменения тока, пиковое собственное напряжение ограничения на компоненте не совпадает по времени с пиковым напряжением на индуктивном элементе, поэтому они могут в большинстве случаев рассматриваться независимо.

1.1.4 Структурно-функциональный уровень защиты

Структурно-функциональные методы защиты заключаются в изменении функциональных принципов построения ТС или их отдельных частей и структуры используемых сигналов для повышения стойкости ТС к воздействию ЭМИ.

Понижение чувствительности систем ТС к воздействию ЭМИ зависит не только от экранирования, заземления и т.п., но и от используемой системы модуляции или кодирования сигнала. Таким системам модуляции, как амплитудная, частотная и фазовая, присуще свойство помехозащищенности. Например, система с частотной модуляцией имеет очень слабую восприимчивость к амплитудным помехам. Для увеличения помехозащищенности можно использовать цифровые методы обработки сигнала, например амплитудно-, широтно- и частотно-импульсное кодирование. Преимущества систем кодирования и модуляции относительно друг друга проявляются в каждом конкретном случае, и их предпочтительное применение определяется многими факторами. Использование различных систем кодирования и модуляции для понижения чувствительности ТС к помехам подробно рассматривается в теории обеспечения требований ЭМС ТС.

Чувствительность ТС к воздействию ЭМИ в значительной степени зависит от диапазона используемых частот и принятой системы рабочих сигналов. Поэтому очевидным методом зашиты в этом случае является увеличение энергии полезных сигналов, амплитуды, длительности и соответствующий выбор несущих частот принимаемых сигналов с учетом спектральных характеристик возможных ЭМИ.

При выборе структуры сигнала также необходимо учитывать, что:

- к уменьшению степени влияния ЭМИ приводит обеспечение жесткой временной привязки последовательности единичных сигналов;
- вероятность ошибок, вызываемых импульсными помехами, в системе связи с фазовой модуляцией в два раза меньше, чем при когерентном приеме сигналов с амплитудной и частотной модуляциями (при одной и той же мощности полезного сигнала).

Одним из направлений повышения стойкости ТС к воздействию ЭМИ является использование алгоритмических методов. Например, в разрабатываемых ТС может быть реализована программа с неполным алгоритмом декодирования, отказывающаяся от декодирования любой достаточно сомнительной последовательности единичных сигналов (может применяться, когда ошибка декодирования недопустима).

В последнее время все больше внимания уделяется разработке быстродействующих датчиков, фиксирующих начало действия ЭМИ, сигнал с которых является командой для блокирования нежелательных эффектов, возникающих в ТС, например, для обнуления цепей, в которых появились ложные сигналы; для форсирования процесса восстановления или в других целях.

Существенное уменьшение влияния ЭМИ на работоспособность ТС может быть достигнуто известной заменой кабелей и проводных линий связи системами оптоэлектроники, т.е. уменьшением числа контуров тока и связей между отдельными узлами и блоками.

1.1.5 Эффективность защиты аппаратуры конструкторскими методами

Среди конструкторских методов защиты численно можно оценить только экранирование. Эффективность таких методов, как зонирование и заземление можно оценить только качественно, сравнивая устойчивость аппаратуры с грамотным зонированием и заземлением, и без него. После, на основании теоретических и экспериментальных данных разрабатываются рекомендации для грамотного проектирования аппаратуры.

Экраны являются барьерами для проникновения электромагнитных возмущений внутрь аппаратуры и наводки в ней паразитных напряжений и токов. Такие защитные устройства включают:

- экраны из проволочной сетки;
- покрытия из проводящей краски;
- покрытия вакуумной металлизацией;
- металлическую фольгу, экранирующую аппаратные блоки;
- металлические наполнители, добавляемые к пластмассовой оболочке, и т.п.

Охарактеризовать данные устройства защиты возможно либо измерениями их экранирующих свойств, как установлено в определенной топологической конфигурации, либо дополнительным измерением некоторых внутренних электрических свойств экранирующего материала. Хотя результаты измерений не могут точно указывать, как устройство защиты будет функционировать в произвольной обстановке, они дают полезную информацию для выбора материалов для конкретной электромагнитной обстановки. Для этих целей используются два основных метода измерений: один основан на измерении удельного сопротивления проводящего материала, а другой — на измерении эффективности экранирования материала, используемого для создания экрана.

Удельное сопротивление материала, включающее защитное покрытие, — один из параметров, который может использоваться для характеристики защитных свойств материала. Удельное сопротивление проводящего листа может быть определено, используя испытательную конфигурацию, показанную на Рис. 0.7, в которой удельное сопротивление на постоянном токе будет измерено с помощью электродов, расположенных на поверхности образца.

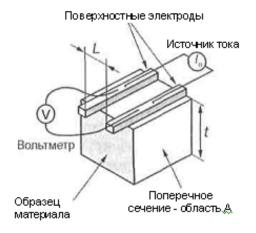


Рис. 0.7. Методика измерения удельного сопротивления с помощью поверхностных электродов

В этом испытании источник постоянного тока I_0 подключен к двум электродам, расположенным расстоянии L и находящимся в хорошем электрическом контакте с блоком проводящего материала, толщина которого t. Вследствие проходящего электрического тока возникает разность потенциалов V_s между электродами. Напряжение может быть измерено вольтметром, а удельное сопротивление определяется выражением

$$\rho = \frac{V_s}{I_0 A} \,, \tag{1.1}$$

где A — площадь поперечного сечения блока материала.

Принимается, что блок — хороший проводник, и току свойственно течь однородно через поперечное сечение (область A) от одного электрода к другому.

Важно обратить внимание, что этот метод измерения применим только на низких частотах, где толщина скин-слоя испытываемого материала очень большая по сравнению с толщиной образца. Если частоту источника увеличить, то толщина скин-слоя, которая определяется выражением:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}},\tag{1.2}$$

где ρ – удельное сопротивление материала, f – частота, μ – абсолютная магнитная проницаемость материала, уменьшается и при некоторой частоте становится сопоставимой с толщиной материала. В этом случае необходимо учесть распределение тока по поперечному сечению проводника и за толщину образца следует брать толщину скин-слоя. Измеренное значение удельного сопротивления на постоянном токе может использоваться для оценки экранирующих свойств материала для высоких частот.

Более явный подход для характеристики экранирующих свойств проводящего экрана произвольной конструкции заключается в непосредственном измерении эффективности экранирования. Известно, что в ближней зоне (или эквивалентно, для низких частот), электрические и магнитные поля влияют на проводник по-разному. Следовательно, для этой зоны экран должен быть охарактеризован двумя различными значениями эффективности экранирования.

В дальней зоне падающее на экран поле представляет собой плоскую волну, для которой эффективность экранирования будет определяться единственным значением.

На рис. 1.9 иллюстрируется концепция определения эффективности экранирования плоской волны металлическими листами (экранами). На рис. 1.9,*а* показана идеальная ситуация, в которой плоская волна падает на бесконечный экран. Экранирующие свойства этого экрана могут быть характеризованы следующим уравнением:

$$S_A = 20 \lg \left(\frac{|A_{out}|}{|A_{in}|} \right), \text{ AB}, \tag{1.3}$$

где A_{out} — основной компонент падающего поля (электрическая или магнитная) в точке наблюдения без проводящего экрана; A_{in} — тот же компонент поля в точке наблюдения, прошедший через экран.

Результирующая эффективность экранирования зависит от угла ψ между падающим полем и нормалью к экрану. Обычно угол ψ выбирается равным 0° для определения экранирующих свойств бесконечного экрана.

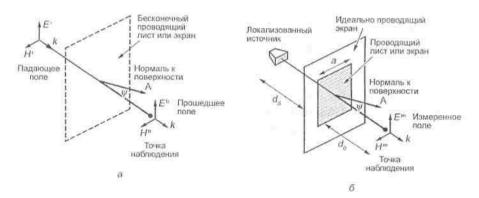


Рис. 0.8. Принцип измерения эффективности экранирования проводящих листов: а – идеальная модель, б – экспериментальная реализация

Для реальных измерений идеализированная конфигурация на Рис. 0.8,*а* не может использоваться вследствие того, что источник падающего поля не имеет бесконечный размер и он расположен не на бесконечно большом расстоянии от экрана. Кроме того, экран не бесконечно большой. Это подразумевает, что результаты измерения могут отличаться от ожидаемых теоретических результатов, использующих бесконечную плоскость, из-за следующих основных эффектов:

- не плоский характер электромагнитной волны источника;
- дифракция на краях экрана.

Для упрощения обычно требуют соблюдение следующих условий в измерительной конфигурации:

- размер экрана $a \gg \lambda$;
- расстояние d от точки наблюдения до экрана и расстояние d_s от источника до экрана должно отвечать условию: d < a и $d_s < a$;
- нормальное падение волны на экран.

С учетом этих требований измерения приближены к случаю распространения плоской волны. Проведя два измерения — без экрана и с экраном, — эффективность экранирования определяется по формуле (1.3).

При применении различных материалов можно получить высокую эффективность экранирования во всем диапазоне частот воздействующих электромагнитных полей. Для повышения целостности экранирования в конструкциях ТС применяют разнообразные проводящие прокладки, которые устанавливаются в местах сопряжения различных частей экранов, в местах ввода ручек управления, под корпуса соединителей и в т.п. местах. Экраны, спроектированные с минимальными апертурами, с использованием для закрытия этих апертур различных проводящих прокладок, клеев, красок, и т.д., можно приближенно рассматривать как сплошной экран из однородного металлического листа. Затухание в

экранированных полостях, выполненных из однородных металлических листов, весьма высокое. Эффективность экранирования растет с частотой за счет скин-эффекта, поэтому даже очень тонкие листы эффективны при высоких частотах.

Простые формулы позволяют рассчитывать потери при поглощении и отражении электромагнитной волны, а также эффективность экранирования S металлическими листами в случае с плоской волной (дальняя зона), когда их размер больше длины волны [2]:

$$S = A + R + B, \, \pi \mathsf{B}. \tag{1.4}$$

где A- потери на поглощение, дБ; R- потери на отражение, дБ; B- потери на повторные многократные отражения, дБ.

Потери на поглощение определяются ослаблением электромагнитной волны, проходящей через толщу экранирующего металлического листа. Известно, что на одной толщине скин-слоя ослабление составляет примерно 8,7 дБ. Более точное значение может быть получено из выражения

$$A = 0.1315t\sqrt{a\mu_r\sigma_r}, дБ (1.5)$$

где t — толщина стенки экрана, мм; f — частота, Γ ц; μ_r — относительная магнитная проницаемость материала экрана; σ_r — относительная (относительно меди) проводимость материала экрана.

Учитывая толщину скин-слоя, получаем:

$$A = 8,69 \frac{t}{\delta}, \text{дБ} \tag{1.6}$$

где t — толщина стенки экрана и δ — толщина скин-слоя должны быть заданы в одной размерности.

Потери на отражения могут быть рассчитаны по формулам для плоской электромагнитной волны:

$$R = 168 + 10\lg\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f}\right), \text{ дБ.}$$
 (1.7)

для электрического поля:

$$R = 322 + 10 \lg \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \right), \, \text{дБ},$$
 (1.8)

для магнитного поля:

$$R = 15 + 10 \lg \left(\frac{\sigma_r f \ r^2}{\mu_r} \right), \, \text{дБ}, \tag{1.9}$$

где f — частота, Γ ц; μ_r — относительная магнитная проницаемость материала экрана; σ_r — относительная (относительно меди) проводимость материала экрана; r — расстояние от источника излучения до экрана, м.

1.1.6 Эффективность защиты аппаратуры с помощью внешних схем защиты

Внешние схемы защиты можно разделить на схемы защиты цепей питания, схемы защиты силовых и сигнальных входов. Для защиты цепей питания применяются развязывающие трансформаторы, стабилизаторы напряжения и источники бесперебойного питания. В развязывающем трансформаторе создаётся разрыв для синфазной помехи в контуре заземления сигнального или силового кабеля. Индуктивная связь допускает нормальную передачу дифференциального напряжения, в то время как гальваническая изоляция препятствует прохождению синфазного напряжения через трансформатор. Решением задач ЭМС, вызванных колебаниями, пульсациями напряжения или даже прерыванием питания в линии с переменным током, является применение стабилизаторов напряжения и источников бесперебойного питания.

В нашем случае (защита интегральных микросхем от электростатического разряда) наиболее интересны схемы защиты силовых и, особенно, сигнальных линий. Такая защита в общем случае строится по комбинированным схемам. Основными элементами защиты от перенапряжений в общем случае являются: газоразрядники, тиристорные элементы защиты, варисторы, лавинные диоды (TVS-диоды), различные фильтры. Газоразрядники и тиристорные элементы защиты относятся к пробойным элементам защиты и используются как первичные защитные элементы, шунтирующие защищаемую схему. Остаточное напряжение на первичных элементах защиты ограничивается варисторами и лавинными диодами, которые являются ограничителями напряжения. После ограничения по амплитуде сигнала помехи на выходе комбинированной схемы остаются низкочастотные и высокочастотные помехи с меньшей амплитудой. В определенных диапазонах частот эти помехи подавляются соответствующими фильтрами, которые являются ограничителями наводок по спектру.

Если рассматривать защиту от ЭСР, то для ее обеспечения применяются только варисторы, диоды и фильтры. Газоразрядники и тиристоры в данном случае применять бессмысленно, так как для их открытия необходимы электромагнитные импульсы с большой энергией (защита от молнии и т.д.). Далее будут рассмотрены варисторы и защитные диоды, как основные элементы, ограничивающие амплитуду напряжения ЭСР.

Твердотельные варисторы

Варисторы — это компоненты нелинейного типа. Они действуют как ограничители напряжения, удерживая напряжение в устройстве, равное или превышающее пробивное, V_{np} . Их время реакции достаточно высокое, но управление энергией имеет некоторые ограничения. Действующий порог (V_{np}) для печатных плат или защиты оборудования обычно варьируется от 6 до 600 В. Эти устройства могут быть двунаправленными (ограничивая положительные и отрицательные импульсы) или униполярными. Варисторы на основе оксидов металла (МОВ) всегда двунаправленные.

Металлические оксидные варисторы — нелинейные элементы, сделанные из спеченной смеси оксида цинка и других металлических диоксидов кремния. Спеченные материальные точки формируют множество параллельных и последовательных соединений микроваристоров. Толщина тела варистора определяет напряжение варистора и длительность импульса для переноса мощности. Объем варистора приближенно пропорционален энергетической возможности. Характеристика варистора (Рис. 0.9) может быть описана выражением:

$$I = kV^a \tag{1.10}$$

где k — константа, которая зависит от конфигурации варистора, a — показатель нелинейности экспоненты (типичное значение: 35–50).

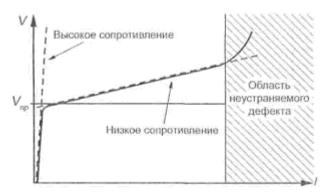


Рис. 0.9. Основные вольтамперные характеристики варисторов на основе оксида металла

Главная особенность МОВ заключается в комбинации высокой токопроводности и хорошо ограничивающих свойств с относительно дешевизной. Поскольку они не имеют характеристик пробоя, они особенно удобны для использования как основные и вторичные элементы защиты на силовых сетях переменного тока. Также широко распространено использование их в качестве защитного элемента от электростатического разряда.

Очевидно, что при установке варисторов следует минимизировать индуктивность проводников, соединяющих варистор с остальными элементами.

Лавинные диоды

Ограничители перенапряжений в виде защитных лавинных диодов могут эффективно использоваться для защиты от перенапряжений. Они подавляют напряжение переходного процесса как положительной, так и отрицательной полярности. Их главная особенность заключается в высоком показателе нелинейности. Диоды отличаются от металло-оксидных варисторов по нагрузочной способности. Варисторы значительный объем, через который проходит ток, что определяет их повышенную нагрузочную способность. У диодов область, в которой происходит преобразование тока в теплоту, мала, что определяет высокий нагрев компонента. Вольтамперная характеристика варистора не изменяется при поглощении энергии (хотя есть зависимость от температуры).

Диодные ограничители находят применение в схемах ввода и вывода, в коротких линиях и для предохранения напряжений питания постоянного тока в амплитуде между 6 и 250 В. При малых емкостях (единицы пикофарад) они могут использоваться в высокочастотных цепях или на платах высокоскоростных устройств. При монтаже таких ограничителей существенное влияние оказывают паразитные параметры монтажа и, в частности, индуктивность выводов защитного компонента и индуктивность монтажных соединений между соответствующим выводом компонента и шиной заземления. Это иллюстрируется на Рис. 0.10, Рис. 0.11. Наличие паразитных емкостных и индуктивных параметров монтажа снижает быстродействие защитных компонентов, и за счет паразитной емкости между элементами монтажа возникают пути высокочастотных токов внешнего воздействия в обход защитных компонентов. Поэтому при проектировании плат следует снижать индуктивность проводников заземления путем, например, увеличения их ширины или подключения выводов к слою опорного напряжения, а также снижать емкость между сигнальными проводниками, уменьшая их ширину и разнося их на максимально возможно расстояние. Кроме этого, снижению емкости проводниками и уменьшению индуктивности будет способствовать максимальное заполнение пробельных мест на поверхности платы фольгой под потенциалом опорного напряжения или питания.

Для наибольшей эффективности защиты сигнальных цепей от ЭСР варисторы и лавинные диоды могут применяться в комбинированной схеме защиты, представленной на Рис. 0.12. В ней первичным ограничивающим элементом является варистор. Далее, напряжение, ограниченное варистором, распределяется между последовательным

элементом и диодом. Таким образом, обеспечивается двухступенчатое понижение стрессового напряжения. Также последовательный элемент ограничивает ток через вторичный элемент и обеспечивает корректное его распределение между первичным и вторичным элементом.

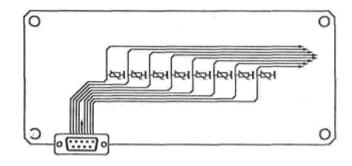


Рис. 0.10. Установка ограничителей на печатной плате

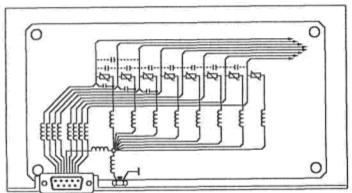


Рис. 0.11. Эквивалентная схема узла установки ограничителей на печатную плату

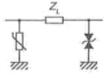


Рис. 0.12. Комбинированная схема защиты с варистором и диодом.

Теперь подведем итоги и определим эффективность снижения помехи, вызванной электростатическим разрядом, с помощью схемотехнических методов. Предположим, что конструкторский уровень защиты может обеспечить снижение уровня напряжения, воздействующего на аппаратуру с 20 до 1 кВ. Для первичного элемента защиты, варистора, уровень ограничения должен лежать в пределах 500–600В, т.к. варисторы с низким пробойным напряжением не рассчитаны на входное напряжение 1 кВ. Аналогично, уровень ограничения напряжения у вторичного элемента защиты, диода, должен быть 200–250 В. Таким образом, после защиты аппаратуры схемотехническими методами, на входы интегральных микросхем попадает импульсная помеха, вызванная

электростатическим разрядом, со следующими параметрами: максимальная амплитуда импульса напряжения 250 B, фронт – 1 нс.

1.1.7 Требования к встроенным средствам защиты от ЭСР интегральных микросхем

На Рис. 0.13 приведены предельные значения энергии, при которой повреждаются различные компоненты РЭС. Как видно, интегральные микросхемы повреждаются в широком диапазоне энергий – от 10^{-7} до 10^{-3} Дж. Энергия электростатического разряда по модели человеческого тела (НВМ) составляет 0.2 Дж. Отсюда следует, что внешняя защита должна существенно ослаблять энергию воздействия ЭСР.



Рис. 0.13. Энергия повреждения основных компонентов РЭС

Важное требование к встроенным средствам защиты – условие применения защитных схем – не ухудшать параметры защищаемой ИС. Также есть еще ряд требований:

- они должны иметь небольшую площадь;
- эффективно ограничивать напряжение разряда, подаваемого на схему;
- шунтировать напряжение и токи перегрузки, возникающие при ЭСР;
- ограничивать физическую область схемы на кристалле, на которую воздействует ЭСР;
- иметь максимально быстрое время срабатывания и вносить минимальное время задержки в нормальную работу ИС в диапазоне изменений питающего напряжения.

Определим основные параметры, которые должны быть у встроенных средств защиты, чтобы обеспечить работоспособность КМОП микросхем при воздействии ЭСР. Рассмотрим уровень напряжения, до которого должна понижать встроенная защитная схема входное стрессовое напряжение. КМОП микросхемы работают при напряжении питания до 15 В. Тогда пиковое значение импульса, при котором не произойдет пробоя подзатворного окисла, можно повысить до 30 В. Скорость срабатывания элементов защиты должна быть 1 нс или менее. Самое трудное – обеспечить минимальные задержки и частотные искажения для полезного сигнала при нормальном функционировании схемы. Сейчае существуют высокочастотные КМОП микросхемы, которые работают на частотах до 10 ГГц. Тогда их защитные схемы должны иметь такую же полосу пропускания. Легко обеспечить нужную полосу пропускания для различных микроконтроллеров, рабочая частота которых варьируется от 20 до 100 МГц [10, 11]. Защита микроконтроллеров от ЭСР наиболее актуальна, т.к. они ставятся в различной аппаратуре в непосредственной близости от различных портов, интерфейсов пользователя, к которым может прикоснуться оператор.

На основании данных о эффективности конструкторского и схемотехнического уровней защиты, получается, что встроенная защита интегральных микросхем должна понижать напряжение стрессового воздействия с уровня 250 В до 30 В. На самом деле в устройствах редко применяется весь описанный ранее комплекс защиты от ЭСР, поэтому многие микросхемы выдерживают воздействие в 500 В и даже в 1000 В. Для нашей задачи возьмем максимальное напряжение, от которого должна защищать встроенная схема защиты – 500 В.

Итак, требования к встроенному защитному элементу КМОП микросхем от ЭСР:

- снижение напряжения импульсного воздействия с 500 В до 30 В;
- скорость срабатывания элемента 1 нс или менее;
- максимально возможная полоса пропускания (в зависимости от микросхем, в которых схема защиты применяется).

Эти требования являются исходными данными для разработки модели встроенного элемента защиты.

1.1.8 Выводы по разделу

Была рассмотрена концепция трехуровневой защиты аппаратуры от помех: конструкторский уровень защиты, схемотехнический и структурно-функциональный уровень. Конструкторский и схемотехнический уровень снижают уровень воздействия до значений, которые не могут привести аппаратуру к необратимым отказам. Структурно-

функциональная защита является защитой пассивной, то есть она исправляет искаженную помехами передаваемую информацию. Такая защита, естественно, не может защитить от воздействий ЭМИ, выводящих из строя радиоэлектронную аппаратуру. Но благодаря этой защите устройство будет правильно функционировать при ослабленных схемами защиты помехах.

Такой конструкторский метод, как экранирование, может давать очень высокое ослабление помехи — до 100 дБ. Но если рассматривать аппаратуру не специального назначения, эффективность ее экранирования будет не выше 30 дБ из-за различных апертур, портов, интерфейсов пользователей, кабелей и т.д. Такое экранирование позволяет снизить уровень напряжения электростатического разряда с 20 кВ до 1 кВ.

Из схемотехнических средств для защиты от ЭСР подходят такие элементы, как варисторы, лавинные диоды и их комбинированные схемы. Применение этих средств защиты позволяет сократить амплитуду импульсной помехи с 1 кВ до 250 В. Так как такой защитный комплекс применяется не во всей аппаратуре, то для встроенных средств защиты ИМС от электростатического разряда оставлен запас — они должны снижать уровень помехи в 500 В.

Из приведенных выше результатов были определены требования к встроенным средствам защиты от ЭСР интегральных микросхем:

- снижение напряжения импульсного воздействия с 500 В до 30 В;
- скорость срабатывания элемента 1 нс или менее;
- максимально возможная полоса пропускания (в зависимости от микросхем, в которых схема защиты применяется).

Эти требования являются исходными данными для разработки модели встроенного элемента защиты.

1.2 Тестирование на воздействие ЭСР

1.2.1 ЭСР и варианты его возникновения в ИС

Электростатический разряд представляет собой существенную опасность для ИС, и разработка защитных элементов от него — важная ступень проектирования устройства.

Существует три способа образования электростатического заряда:

Трибоэлектрический. При соприкосновении и разделении двух объектов один всегда заряжается положительно, другой — отрицательно. Пример: контакт обуви с полом при ходьбе приводит к образованию статического потенциала на идущем работнике.

Индукционный. При перемещении заряженного объекта вблизи незаряженного в последнем генерируется статический заряд с противоположным знаком и, как следствие,

возникают индукционные токи. Пример — прикосновение рукой, несущей высокий заряд, к корпусу ЭСР-чувствительной микросхемы (как правило, самой дорогостоящей).

Обратите внимание: для повреждения кристалла индукционными токами не обязательно даже прикасаться рукой непосредственно к выводам корпуса микросхемы.

Емкостной. Заряд есть произведение напряжения на емкость, поэтому при постоянной величине заряда уменьшение емкости влечет рост потенциалов разъединяемых поверхностей.

Моделирование разряда ведется на основе модели человеческого тела, модели механизма.

1.2.2 Модель человеческого тела (Human Body Model, HBM)

В результате контакта человеческого тела с устройством может произойти ЭСР. Тело может обладать отличным от земли потенциалом, например, в результате трения. Тестовая схема для этого случая представлена на Рис. 1.141.14.*a*.

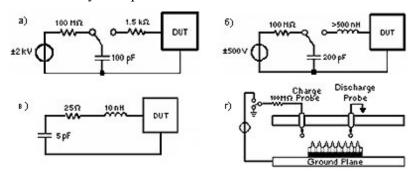


Рис. 1.144. Тестовая схема модели: а) человеческого тела; б) механической модели; в) модели заряженного устройства; г) устройства для CDM

В этой схеме конденсатор ($C = 100 \text{ n}\Phi$) заряжается через высокоомный резистор (R = 100 MOM) напряжением $\pm 2 \text{ kB}$, затем разряжается через 1,5-кОм резистор в тестируемое устройство. Конденсатор моделирует ёмкость человеческого тела, которая на самом деле может варьироваться до 500 пФ. Сопротивление человеческого тела также может изменяться в достаточно широких пределах - от нескольких десятков Ом до сотен кОм, в зависимости от условий. Напряжение разряда также может достигать 4 кВ. Согласно существующим стандартам, имеется ряд тестовых схем для различных устройств. Данная схема соответствует тестированию ИС. Одним из самых важных параметров в тесте является время нарастания тока во время разряда. Оно должно быть порядка десятых долей наносекунд. Но при этом важно заметить, что ток разряда не сразу распространяется по проводящей области. Поэтому в начале существует опасность перегрузки защитной схемы. С другой стороны, этот вариант может быть не так опасен, так как ЭСР происходит, как правило, не в самой схеме, а где-то на корпусе или на

связанном с контактом проводнике, который, в свою очередь, обладает достаточно высокой индуктивностью, дающей защитной схеме время полностью включиться.

1.2.3 Модель механизма (Machine Model, MM)

ЭСР в данной модели возникает в результате различных механических воздействий, всегда имеющих место в оборудовании для производства ИС. Корпус и механизмы такого оборудования сделаны из металла, но неизбежно содержат различные пластиковые части (например, подшипники), сильно отличающиеся по размерам и формам. При движении этих частей может создаваться электростатический заряд и происходить его разряд. На Рис. 1.14,6 изображена тестовая схема для этой модели.

Эта тестовая схема аналогична предыдущей, с той лишь разницей, что сопротивление металлических частей устройства мало, что приводит к значительно большему пиковому току в тестируемом устройстве. Но зато в результате большой индуктивности, имеющей место в данном случае, перегрузки защитной схемы не происходит, амплитуда и время роста тока ограничены. Энергия, имеющая место в этой модели, выше, чем энергия НВМ вследствие отсутствия сопротивления. Поэтому важно заметить, что для того, чтобы не допустить повреждения тестируемого устройства, необходимо снизить напряжение до ±200 В.

Так же существуют следующие модели воздействия:

- модель заряженного устройства (Charged-Device Model, CDM),
- модель заряженного кабеля (Charged-Cable Model, CCM),
- модель импульса линии передач.
 Но в данной работе они рассмотрены не будут.

1.2.4 Повреждение ИС ЭСР

ЭСР в первую очередь повреждает наиболее слабо защищенные компоненты, что приводит к следующим повреждениям:

- тепловой пробой *p-n*-перехода;
- возникновение в окисле пустот, нитевидных образований, испарение окисла, что приводит к замыканиям и неправильной работе ИС;
- металлическая разводка и контакты могут плавиться и испаряться, в результате происходят замыкания и отказ ИС (Рис.1.1.15).

Тенденции к снижению глубин залегания переходов, уменьшению толщины подзатворного окисла и толщины разводки увеличивают вероятность повреждения

устройства электростатическим разрядом. В первую очередь повреждаться будет тонкий подзатворный окисел входных и выходных КМОП-структур и связанная с ними металлическая разводка. Если в качестве контактов используются силициды металлов, это также ухудшает защищённость схемы от ЭСР. В этом случае имеются специальные схемотехнические и технологические решения, что усложняет технологический процесс и увеличивает стоимость изготовления.

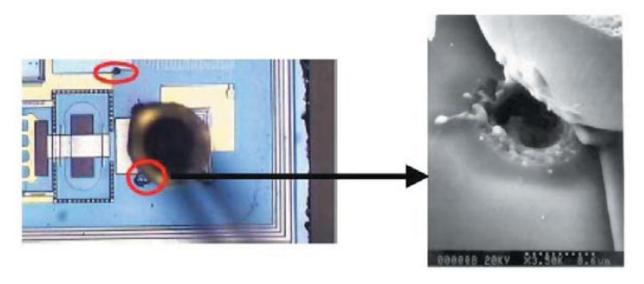


Рис.1.15. Повреждения, вызванные ЭСР

Известен целый ряд отдельных устройств защиты от ЭСР, обладающих хорошими характеристиками, но для наилучшей защиты ИС они должны быть подобраны и включены оптимальным образом, что нельзя сделать автоматически. Существуют два метода разработки суммарной защиты устройства: метод случайного пути и метод выборочного пути.

В методе случайного пути ток ЭСР находит собственный случайный путь от одной контактной площадки к другой. Слабое звено защитной схемы в первую очередь достигает напряжения пробоя. Эти элементы в разных ситуациях различны. За несколько итераций такие звенья отбираются и отбраковываются. Наконец, достигаются желаемые характеристики по ЭСР. Метод случайного пути не является универсальным и специфичен не только для технологии, но и для варианта исполнения схемы на кристалле.

Другой метод заключается в направлении тока ЭСР по определённому пути. Выбранный путь имеет самое низкое сопротивление по сравнению с другими паразитными цепями. В этом методе отладка защитной схемы не занимает так много времени, поскольку поиск и устранение наиболее слабых элементов проще. Метод выборочного пути более подвержен систематизации.

Важно заметить, что устройства, используемые в защитных схемах, можно разделить на два типа: пробойные (Breakdown Devices, BD) и беспробойные (Non-Breakdown Devices, NBD). Устройства первого типа работают в режиме между первым и вторым (тепловым) пробоем, их действие сильно зависит от топологического исполнения и технологических процессов, вследствие чего их проектирование достаточно сложно. Намного легче использовать беспробойные устройства, то есть работающие в нормальном режиме. Моделирование таких схем легче и её результаты более предсказуемы. Также важно отметить, что при тенденции к росту числа элементов и, соответственно, размера ИС, происходит увеличение собственной ёмкости устройства. Для поддержания точных значений напряжений питания необходимо использование в ИС развязывающих конденсаторов. Эти конденсаторы в условиях уменьшения величины напряжения питания и роста тока могут оказать значительную помощь в уменьшении напряжения ЭСР для $V_{cc}-V_{ss}$, тем самым защищая основное устройство. Также уменьшение цепи топологических размеров влечёт за собой увеличение рабочей частоты устройства. Это приводит к тому, что время роста ЭСР импульса для модели заряженного устройства сравнимо со временем работы защитных схем, что позволяет быстрее реагировать на этот импульс.

1.2.5 Режимы тестирования ЭСР в зависимости от вариантов его возникновения на контактных площадках

Наиболее часто ЭСР возникает между контактной площадкой входного сигнала и контактной площадкой одной из шин питания. ЭСР может иметь положительную или отрицательную полярность по отношению к потенциалам шин питания V_{dd} и V_{ss} . Таким образом, имеют место четыре режима возникновения ЭСР на контактной площадке входного/выходного сигнала, приводящие к различным путям протекания стрессового тока. Варианты измерений ЭСР для этих режимов представлены на Рис.1.16,a.

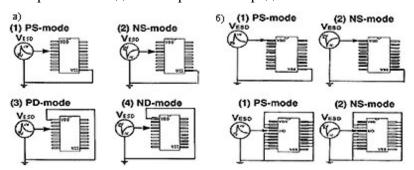


Рис.1.16. Измерение выносливости устройства к ESD для четырёх режимов возникновения разряда между контактной площадкой входного/выходного сигнала и контактной площадкой одной из шин питания (а); дополнительные режимы возникновения ESD на контактной площадке (б)

Для первого режима (PS-mode) положительный по отношению к потенциалу земли (V_{ss}) электростатический разряд подаётся на одну из контактных площадок входных сигналов, шина питания (V_{dd}) не подсоединена и стрессовый ток покидает устройство через шину земли. Второй режим (NS-mode) - отрицательный относительно потенциала земли ЭСР стресс на контактной площадке, шина питания не подсоединена, стрессовый ток покидает устройство через шину земли. Для третьего режима (PD-mode) оборвана шина земли, ЭСР стресс положителен относительно потенциала шины питания, через которую стрессовый ток покидает устройство. Для четвёртого режима (ND-mode) оборвана шина земли, ЭСР стресс отрицателен относительно потенциала шины питания, через которую стрессовый ток покидает устройство. Во всех 4-х случаях остальные контактные площадки входов/выходов не подсоединены. Эти стрессовые напряжения могут нанести повреждения как п-МОП, так и р-МОП устройствам входного или выходного буфера. Например, в случае отсутствия защитной схемы от ЭСР между контактной площадкой и шиной питания будет происходить повреждение ИС. В NDрежиме стрессовый ток сначала потечет через схему защиты от контактной площадки к шине земли, а затем через защитную схему между шинами питания (если таковая имеется) или через элементы внутренней схемы к шине питания V_{dd} . Также любая КМОП ИС обладает паразитными емкостями и сопротивлениями шин, на которых возникает падение напряжения. Это ведёт к повреждению внутренних элементов ИС, несмотря на имеющуюся защиту. ND-режим ESD приводит к возникновению стрессового напряжения между шинами питания. Если ток ЭСР не выводится быстро и эффективно из ИС, то могут иметь место повреждения в защитной схеме между V_{ss} и V_{dd} , а именно разрушения полевого окисла паразитных структур между двумя n+ диффузиями. Таким образом, необходимо обеспечивать защиту от ЭСР между контактной площадкой и обеими шинами питания, чтобы полностью обезопасить устройство от повреждения в случае возникновения ЭСР в любом из четырёх режимов.

Но, даже обеспечив полную защиту от вышеперечисленных четырёх режимов возникновения ЭСР, нельзя быть полностью уверенным в полной защите ИС. Есть вероятность возникновения ЭСР между контактными площадками входного сигналов или контактными площадками шин питания. Ток проходит от одной контактной площадки к другой по некоторому пути через внутренние элементы устройства. Для определения защищённости устройства вводятся дополнительные режимы проведения измерений, представленные на Рис.1.16,6.

Для таких условий измерения ЭСР защиты внутренние элементы достаточно уязвимы даже при наличии полной входной защиты.

В каждом режиме стрессовый ток течёт по своему собственному пути. Также будет происходить повреждение внутренних компонентов при отсутствии какой-либо защиты от ЭСР кроме входной защиты. Для последних четырёх режимов трудно обнаружить повреждение ИС просто отслеживанием тока утечки. Для этого часто требуется полный функциональный контроль для обнаружения неисправной работы. Для обеспечения хорошей защиты от ЭСР необходимо тестировать ИС по всем восьми режимам для трёх моделей: НВМ, ММ, СВМ. В случае недостаточной защищённости можно использовать дополнительные защитные элементы между контактными площадками "чистого" и "грязного" напряжения питания, между контактными площадками шин питания, а также улучшать характеристики входной защиты.

1.2.6 Выводы по разделу

Описанные выше сложности, вызванные существованием такого явления, как ЭСР, заставили задуматься о возможных способах упрощения процедуры проектирования устойчивой к ЭСР электроники. Одним из самых актуальных способов является компьютерное моделирование воздействия ЭСР на ИС. Данный способ, конечно, не может дать абсолютной точности, и причин тому несколько: в любых вычислениях присутствует определенная погрешность, так же модели, которые будут применяться, не будут точно отображать все свойства испытуемых объектов. Тем не менее, провести компьютерное моделирование микросхемы несравненно дешевле, чем изготавливать реальный образец для испытаний; так же моделирование существенно сэкономит время, так как развитая информационная сеть предприятий позволит анализировать данные, вносить изменения и проводить повторные испытания «на лету». Да, результаты испытаний будут обладать определенной степенью условности, и забывать об этом нельзя, одной из основных целей данной работы является определение вероятной точности результатов моделирования. Так же нельзя скидывать со счетов тот факт, что достаточно точное моделирование потребует соблюдения ряда условий, таких как:

- создание производительной вычислительной системы
- затраты на эксплуатацию и поддержание работоспособности вычислительной системы
- создание программного комплекса, которые позволил бы реализовать все преимущества компьютерного моделирования

Тут необходимо отметить, что при использовании термина «вычислительной системы», подразумевается не отдельная рабочая станция или сервер, в данном аспекте имеет смысл говорить об использовании для расчетов технологии распределенных вычислений. Распределенные вычисления позволят более полноценно использовать

вычислительные ресурсы парка персональных компьютеров предприятия, чем создание отдельной группы серверов.

В итоге формируется список вопросов, на которые предстоит ответить в ходе работы:

- 1. Установить возможность моделирования сегодняшними программными средствами ЭСР
- 2. Установить возможность моделирования сегодняшними программными средствами воздействия ЭСР на микросхемы
 - а. При использовании существующих моделей микросхем
 - b. Попытаться создать модель, максимально корректно реагирующую на ЭСР
- 3. Определить перечень проблем, которые необходимо решить для получения корректных результатов моделирования
- 4. Оценить ресурсоемкость вычислений, необходимых для корректного моделирования

1.3 Разработка методики проведения эксперимента

1.3.1 Определение актуальных параметров испытательного генератора

Первостепенной задачей при выполнении данной работы стало создание генератора ЭСР [12, 13]. В качестве опорной документации использовались стандарты ГОСТ 51317.4.2-99 и МІС-STD-883H, как основополагающие для отечественной и зарубежной промышленности.

Первым этапом стал анализ приведенных в стандартах требований и их адаптация к виртуальному моделированию. В отношении ГОСТ 31317.4.2-99 адаптация свелась к исключению из цикла испытаний моделирования воздушного разряда. В отношении MIL-STD-883H серьезной адаптации не потребовалось. Рассмотрим упомянутые выше стандарты подробнее.

ГОСТ 51317.4.2-99

Согласно ГОСТ Р 51317.4.2-99 при проведении испытаний на устойчивость к ЭСР используются следующие параметры испытательного генератора (*Таблица*.2.2):

Степени жесткости испытаний

Таблица.2.2

| 1а – контактный разряд | | 1б – воздушный разряд | | |
|---|------------------------------|-----------------------|------------------------------------|--|
| Степень жесткости | Испытательное напряжение, кВ | Степень жесткости | Испытательное напряжение, кВ | |
| 1 | 2 | 1 | 2 | |
| 2 | 4 | 2 | 4 | |
| 3 | 6 | 3 | 8 | |
| 4 | 8 | 4 | 15 | |
| $X^{1)}$ | Специальное | $X^{1)}$ | Специальное | |
| $^{1)} X$ — открытая степень жесткости. | | | | |

Так же стандарт предъявляет следующие требования к форме импульса испытательного генератора:

- длительность фронта импульса 0.7–1 нс,
- общая длительность импульса порядка 60 нс,
- форма импульса представлена на Рис. 0.1.

Испытания будут проводиться в соответствии со степенями жесткости для контактного разряда.

Данные параметры и будут отправной точкой всего эксперимента. Стоит отдельно отметить, что модели HBM и MM будут заменены моделью из MIL-STD-883H, производной которой они являются.

MIL-STD-883H (раздел 3015.8)

В отличие от ГОСТ 51317.4.2-99, данный стандарт устанавливает не степень жесткости испытаний, а класс стойкости устройства (см. *Таблица 1.0*)

Класс стойкости устройства по MIL-STD-883H

Таблица 1.0

| yer ponerba no MHE BID 00311 | | |
|------------------------------|------------------|--|
| Class 0 | < 250V | |
| Class 1A | 250V to 499V | |
| Class 1B | 500V to 999V | |
| Class 1C | 1 000V to 1 999V | |
| Class 2 | 2 000V to 3 999V | |
| Class 3A | 4 000V to 7 999V | |
| Class 3B | ≥ 8 000V | |

Так же данный стандарт предъявляет следующие требования к форме импульса помехи:

- длительность фронта импульса менее 10 нс,
- общая длительность импульса порядка 150 ± 20 нс.

В качестве испытательных напряжений для данного генератора помех выбраны пороговые точки для классов устройств.

1.3.2 Моделирование испытательного генератора

Моделирование испытательных генераторов проводилось при четком соблюдении требований, изложенных в стандартах. Проверка формы и амплитуды сигнала проводилась на нагрузке 50 Ом, что так же отговорено в стандартах.

ГОСТ 51317.4.2-99. Основными элементами модели ИГ ЭСР являются:

• зарядный резистор R3;

- накопительный конденсатор Сн;
- разрядный резистор Rp;
- разрядный ключ;
- провод заземления ИГ;
- источник электропитания.

На Рис.1.157 представлена модель генератора, соответствующая ГОСТ 51317.4.2-99.

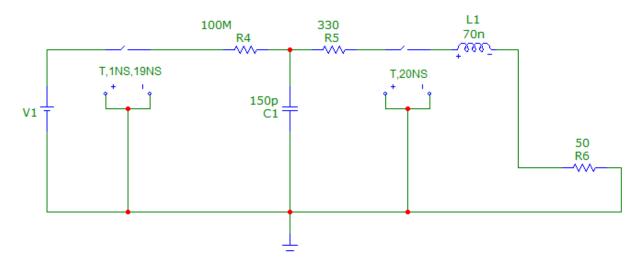


Рис.1.157. Модель генератора ЭСР по ГОСТ 51317.4.2-99

Технические характеристики ИГ

В Таблице 1.4 приведены требования к параметрам генератора ЭСР

Требования к генератору ЭСР

Таблица 1.4

| треоования к тенератору ЭСР | | |
|---|---|--|
| Накопительная емкость (Сн) | 150 πΦ <u>+</u> 10 % | |
| Разрядное сопротивление (Rp) | 330 Ом <u>+</u> 10 % | |
| Зарядное сопротивление (R3), MOм | От 50 до 100 | |
| Выходное напряжение, кВ | До 8 (номинальное) для контактного разряда; | |
| Погрешность индикации выходного напряжения, % | ±5 | |
| Полярность выходного напряжения | Положительная и отрицательная (переключаемая) | |

Форма импульса, полученная при использовании рассмотренной выше модели генератора ЭСР показана на Рис. 1.18

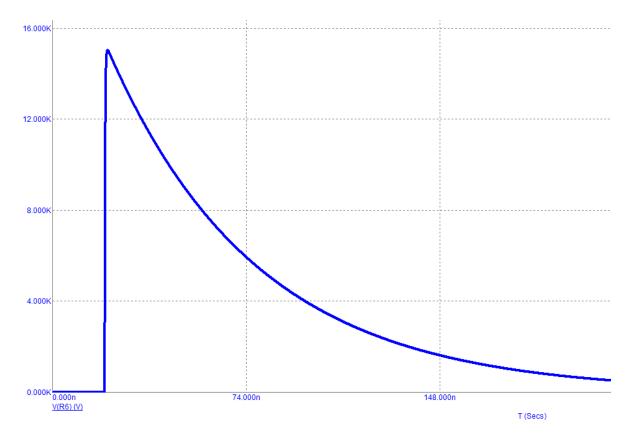


Рис. 1.18. Форма импульса генератора ЭСР, построенного в соответствии с ГОСТ 51317.4.2-99

MIL-STD-883H (раздел 3015.8). Основными элементами модели ИГ ЭСР являются:

- зарядный резистор R3;
- накопительный конденсатор Сн;
- разрядный резистор Rp;
- разрядный ключ;
- провод заземления ИГ;
- источник электропитания.

На Рис. 1.19 представлена модель генератора, соответствующая MIL-STD-883H.

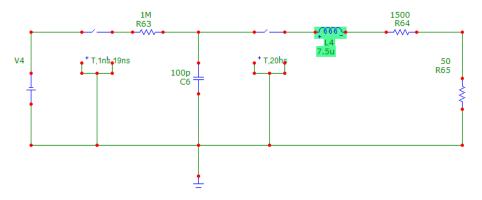


Рис. 1.19. Модель генератора ЭСР по MIL-STD-883H

Технические характеристики ИГ

В Таблица 1.5 приведены требования к параметрам генератора ЭСР

Таблица 1.6

Требования к генератору ЭСР

| Накопительная емкость (Сн) | 100 πΦ <u>+</u> 10 % |
|---|---|
| Разрядное сопротивление (Rp) | 1500 Ом <u>+</u> 1 % |
| Зарядное сопротивление (R3), МОм | От 1 до 10 |
| Выходное напряжение, кВ | До 8 (номинальное) для контактного разряда; |
| Погрешность индикации выходного напряжения, % | <u>+</u> 5 |
| Полярность выходного напряжения | Положительная и отрицательная (переключаемая) |

Форма импульса , полученная при использовании рассмотренной выше модели генератора ЭСР показана на Рис. 1.20

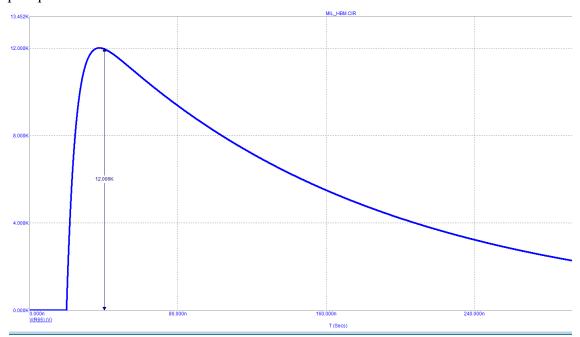


Рис. 1.20. Форма импульса генератора ЭСР, построенного в соответствии с MIL-STD-883H

Стоит отдельно отметить, что и в ГОСТ 51317.4.2-99 и в MIL-SDT-883H указанные напряжения являются выходными параметрами генератора ЭСР, соответственно, напряжение источника питания при моделировании отличается от необходимого напряжения на выходе. Соответствующие соотношения приведены в *Таблица 1*.6.

Соотношение напряжения источников питания и напряжения на выходе генератора ЭСР для ГОСТ 51317.4.2-99 и MIL-STD883H

| -99 и MIL-STD883H | | | | |
|------------------------|--|--|--|--|
| Амплитуда импульса, кВ | | | | |
| ΓΟCT 51317.4.2-99 | | | | |
| 2 | | | | |
| 4 | | | | |
| 6 | | | | |
| 8 | | | | |
| 15 | | | | |
| 30 | | | | |
| 100 | | | | |
| MIL-STD-883H | | | | |
| 0,25 | | | | |
| 0,504 | | | | |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| | | | | |

| 135 | 4 |
|-----|----|
| 270 | 8 |
| 405 | 12 |

1.3.3 Микросхемы, используемые в эксперименте

Серия КР1533

Маломощные быстродействующие цифровые интегральные микросхемы серии КР1533 предназначены для организации высокоскоростного обмена и обработки цифровой информации, временного и электрического согласования сигналов в вычислительных системах.

Микросхемы серии КР1533 по сравнению с известными сериями логических ТТЛ микросхем обладают минимальным значением произведения быстродействия на рассеиваемую мощность. Зарубежный аналог — серия SN74ALSxxxx фирмы Texas Instruments (США).

Микросхемы изготавливаются по усовершенствованной эпитаксиально-планарной технологии с диодами Шоттки и окисной изоляцией, одно- и двухуровневой металлизированной разводкой на основе PtSi-TiW-AlSL.

Конструктивно микросхемы серии КР1533 выполнены в 14-, 16-, 20- и 24выводных стандартных пластмассовых корпусах типа 201.14-1, 238.16-1, 2140.20-8, 2142.24-2.

Технические характеристики:

- Стандартные ТТЛ входные и выходные уровни сигналов,
- Напряжение питания $5.0 \text{ B} \pm 10 \%$,
- Задержка на вентиль 4 нс,
- Мощность потребления на вентиль 1 мВт,
- Тактовая частота до 70 МГц,
- Выходной ток нагрузки низкого уровня до 24 мА,
- Выходной ток нагрузки высокого уровня до 15 мА,
- Гарантированные статические и динамические характеристики при емкости нагрузки 50 пФ в диапазоне температур от -10°C до +70°C и напряжений питания 5 $B\pm10\%$.
- Устойчивость к статическому электричеству до 200 В.

Серия КР1554

Быстродействующие цифровые логические КМОП микросхемы серии KP1554 предназначены для использования в высокопроизводительных системах обработки

информации широкого применения. Высокое быстродействие в сочетании с низкой потребляемой мощностью и большой нагрузочной способностью, широкий набор интерфейсных микросхем серии КР1554 позволяют создавать вычислительные устройства и устройства цифровой автоматики с качественно новыми характеристиками и высокими технико-экономическими показателями.

Микросхемы изготавливаются по КМОП технологии с окисной изоляцией, двухуровневой металлизацией, поликремниевым затвором шириной 1,4 мкм. Конструктивно микросхемы оформлены в пластмассовые корпуса типа DIP с шагом 2,5 мм, с количеством выводов от 14 до 24 и стандартным расположением выводов "питание", "земля". Зарубежный аналог — серия 74АСххх "FACT" фирмы "NATIONAL" (США).

Технические характеристики

- Стандартные КМОП входные и выходные уровни сигналов,
- Диапазон напряжений питания 2-6 В,
- Задержка на вентиль 3,5 нс,
- Тактовая частота до 150 МГц,
- Большой выходной ток нагрузки низкого и высокого уровней 24 мА,
- Гарантированные характеристики в диапазоне температур от -45°C до +85°C и напряжений питания $5B\pm10\%$, $3,3\pm0,3B$,
- Высокая устойчивость к статическому электричеству и защелкиванию.

1.3.4 Методика испытаний

На диаграмме (Рис. 1.21) ниже приведена общая схема работы. Ветвление в схеме уменьшено для более компактного представления.

Испытания по приведенной ниже схеме проводятся как для микросхемы KP1533TM2, так и для KP1554TM2. Цикл начинается заново каждый раз, когда изменяется точка приложения напряжения ЭСР. Основными точками приложения являются: шина питания, шина земли, информационные входы и выходы ИМС,

Первое испытание проводится при 100кВ, так как далеко не во всех случаях модель ИМС проявляет чувствительность к ЭСР при значениях, указанных в ГОСТ 51317.4.2-99 для контактного разряда.

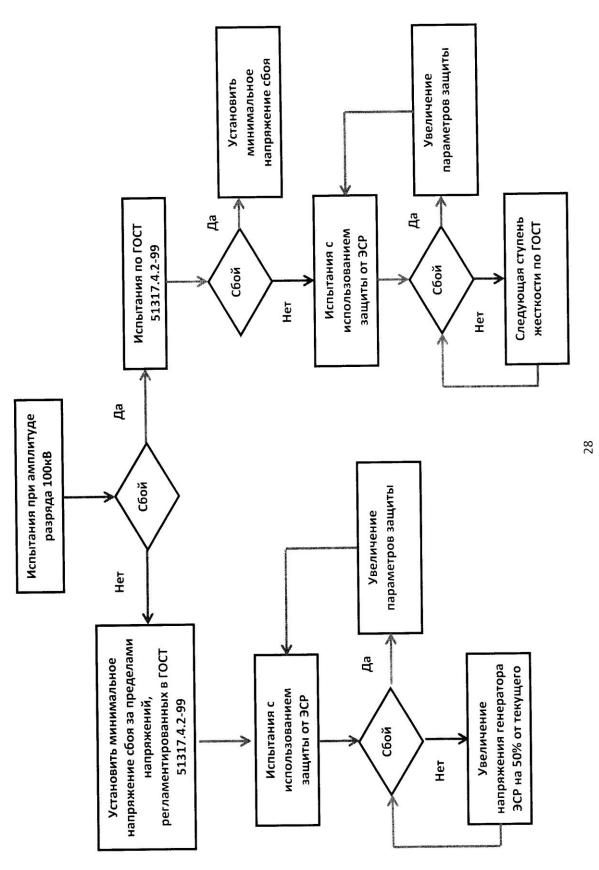


Рис. 1.21. Методика испытаний

1.3.5 Верификация полученных данных

Любое моделирование необходимо сравнивать с результатами, полученными в реальном эксперименте (см. далее). Были сделаны 2 платы с разводкой (Рис. 1.22), соответствующей рекомендациям по ЭМС и не отвечающей этим требованиям. На каждой из плат были испытаны на устойчивость к ЭСР микросхемы КР1533TM2 и КР1554TM2.

В нашем эксперименте будут смоделированы близкие случаи – роль «плохой» разводки будет выполнять модель, не имеющая фильтров, роль платы с «хорошей» разводкой – модель с достаточным набором паразитных параметров и с применением развязывающих конденсаторов.



Рис. 1.22. Реальное устройство, модель которого исследуется в данной работе

1.4 Моделирования стенда для тестирования на ЭСР

1.4.1 Обоснование выбора программного обеспечения

Одной из задач при выполнении данной работы было создание виртуального стенда для проведения испытаний моделей реальных микросхем на воздействие ЭСР. Данный стенд должен был лечь в основу лабораторной работы по соответствующей тематике.

В качестве программной базы работы была выбрана программа Multisim 10.1. Выбор именно этой программы обусловлен следующими факторами:

- 1. Программа достаточно распространенная.
- 2. Наличие возможности покупки лицензии для студентов.
- 3. Простота и наглядность пользовательского интерфейса.
- 4. Возможность работы с виртуальными приборами и/или моделями существующих приборов.

Последний пункт был особенно важен, так как работа с виртуальными приборами положительно скажется на продуктивности проведение, в перспективе, лабораторных работ. Причиной тому служит лучшее понимание студентами природы полученных сигналов, так как для того, чтобы добиться требуемого в задании отображения сигналов им требуется проанализировать потенциальные параметры (амплитуду и длительность импульса). Также, этому способствует то, что сигнал (но в виде, еще не соответствующем требуемому) уже отображен на приборе, и для получения нужного вида сигнала требуется лишь задать (или подобрать) соответствующие значение.

Второй программой стал Microcap 9. Данная программа менее удобна для создания стенда лабораторной работы, тем не менее, она обладает удобным пользовательским интерфейсом, внушительным набором режимов моделирования и несет в своей основе SPICE.

1.4.2 Концепция виртуального стенда

В ходе работы были смоделированы две микросхемы: КР1533ТМ2 (ТТЛШ) и КР1554ТМ2 (КМОП); и сам испытательный стенд. Параллельно проводились натурные испытания этих микросхем, так что модель макета стенда и выбор конкретных микросхем были сделаны с целью определения повторяемостиь результатов между виртуальным и натурным экспериментом.

Испытательный стенд представляет собой минимальную «обвязку» чипа, соответствующую обвязке тестовой платы в эксперименте и, собственно, виртуальную

модель половинки каждой микросхемы. Данный факт обусловлен тем, что KP1533TM2 и KP1554TM2 представляют собой два триггера, объединенных в одной ИМС и функционирующих независимо друг от друга; для эксперимента использовался один триггер (как и в натурном эксперименте). Рассмотрим компоненты виртуального стенда подробнее.

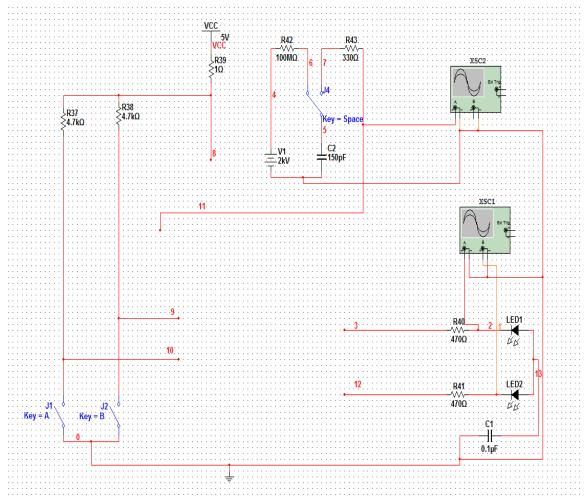
1.5 Модель тестового стенда Multisim 10

Предварительный этап включал в себя создание и испытание нескольких реальных интегральных микросхем (ИМС) на устойчивость к ЭСР в лабораторных условиях. Для испытания были выбраны микросхема с ТТЛШ-логикой КР1533ТМ2 и микросхема с КМОП-логикой КР1554ТМ2, представляющие собой триггеры. Так же были созданы 2 платы с различной разводкой — первая плата имела разводку, учитывающую требования по ЭМС, вторая, соответственно, была преднамеренно сделана максимально уязвимой для помех. Результаты эксперимента прекрасно соотносились с теорией, т.е. сбои ТТЛШ-микросхемы были, в большинстве случаев при переключении из логического 0 в 1, а в случае КМОП примерно равномерны в обоих направлениях, так же КМОП-микросхема показала в целом лучшую устойчивость к ЭСР. Все дальнейшие результаты моделирования будут опираться на данные, полученные в эксперименте, для установления корректности модели.

Модель стенда представлена на Рис. 0.1623.

Первым этапом стало создание модели генератора ЭСР. Используется два варианта генератора, выполненные по ГОСТ Р 51317.4.2-99 и по MIL-STD-883H.

Модель генератора по MIL-STD-883H представлена на Рис. 1.174.



Обозначения на Рис. 0.1623:

- Vcc источник питания
- $Key = A(B) \kappa$ лючи для подачи сигнала на R и S
- 9 и 10 ветви сигнальные входы R и S
- 3 и 12 выходы
- 7 ветвь питание на схему
- 8 ветвь сточник помех
- XSC1 осциллограф, отображающий сигналы на выходах
- XCS2 осциллограф, отображающий сигнал в источнике помех
- Key = Space разрядный ключ

Виртуальный стенд в Місгосар представлен на Рис. 1.25.

При моделировании пришлось увеличить все напряжение на 3, иногда 4 порядка.

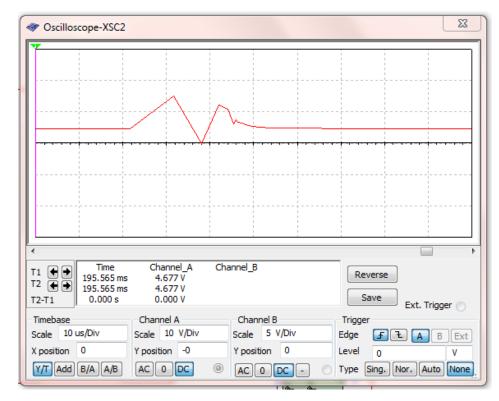


Рис. 1.174. Модель генератора ЭСР по MIL-STD-883H

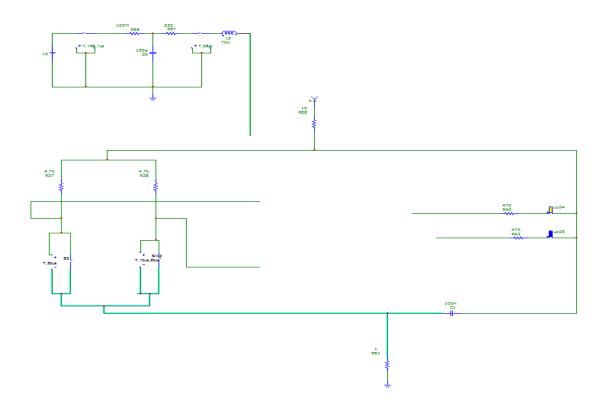


Рис. 1.25. Виртуальный стенд в Місгосар

1.5.1 Создание развернутых моделей микросхем

Первой проблемой, с которой пришлось столкнуться в процессе моделирования, оказалась абсолютная нечувствительность имеющихся в программе моделей микросхем к ЭСР. Вследствие этого было принято решение о создании развернутых моделей микросхем [14–19].

Следующей проблемой стало полное отсутствие внятных данных о внутреннем устройстве микросхем. Так что модели создавались исходя из логических схем, представленных в официальной документации. В эти схемы подставлялись модели элементов И-НЕ и инвертеров, которые характерны для конкретного типа логики. Отсюда приходится сделать вывод, что данные модели весьма условны.

Логическая схема одного триггера KP1533TM2 (Рис. 1.26), взятая из документации с сайта Texas Instruments, логическая схема одного триггера KP1554TM2 (Рис. 1.27), взятая из документации с сайта FairChild: Схемы собственно логических элементов были взяты из справочной литературы.

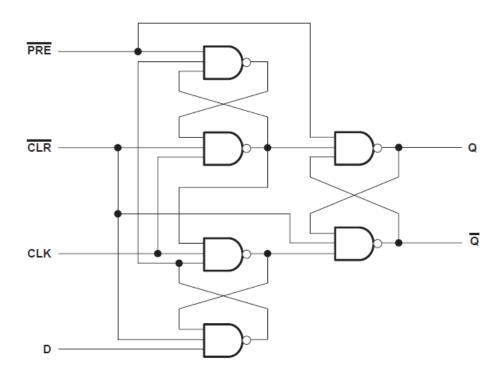


Рис. 1.26. Логическая схема триггера в КР1533ТМ2

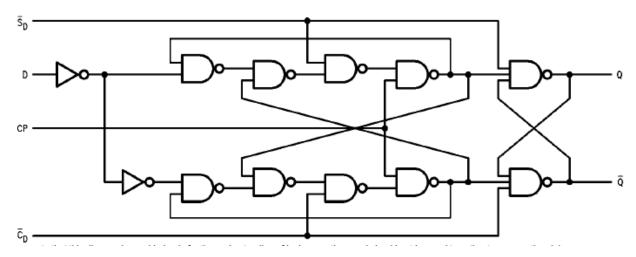


Рис. 1.27. Логическая схема триггера в КР1554ТМ2

Вид отдельного логического элемента И-НЕ, КМОП представлен на Рис. 1.28.

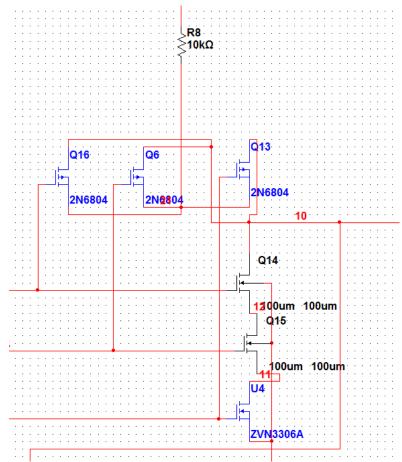


Рис. 1.28. Элемент логики используемой в модели КР1554ТМ2 (И-НЕ)

Вид инвертора, КМОП представлен на Рис. 1.9, а элемент логики, используемой в модели КР1533TM2 (2И-НЕ), на Рис. 1.30.

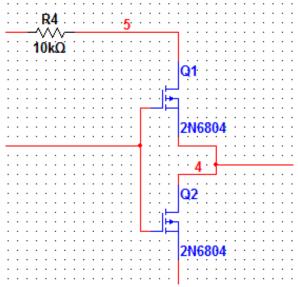


Рис. 1.29. Вид инвертора в модели КР 1554ТМ2

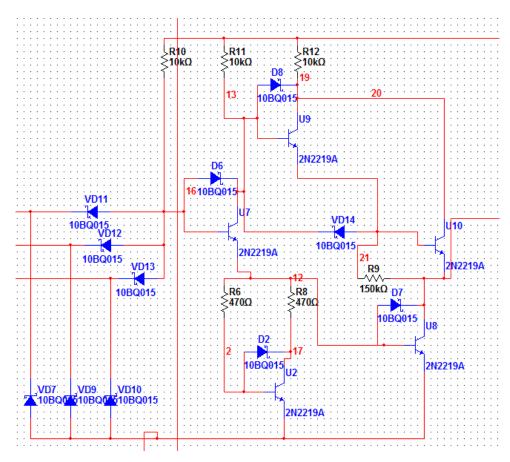


Рис. 1.30. Элемент логики, используемой в модели КР1533ТМ2 (2И-НЕ)

1.5.2 Итоги моделирования в программе Multisim 10.1

После создания развернутых моделей и их отладки был проведен цикл испытаний. Итогом стали следующие выводы:

• Используемая программа Multisim 10.1 не может работать с необходимой точностью.

- Имеющиеся в программе модели ИМС полностью нечувствительны к воздействию ЭСР.
- В справочниках и сети интернет отсутствует внятная информация о точном внутреннем устройстве микросхем серий КР1533 и КР1554, несмотря на их почтенный возраст.
- Корреляция результатов моделирования, даже учитывая множественные допущения, с результатами реального эксперимента достигает 70 %.

1.5.3 Создание развернутой модели испытуемых микросхем в Microcap и их отладка

При попытке воспользоваться имеющимися в программе Містосар моделями «подопытных» ИМС, итог, как и в предыдущем моделировании, оказался неутешительным – полное отсутствие чувствительность к ЭСР. После этого началось составление моделей КР1533ТМ2 и КР1554ТМ2 из дискретных элементов. Стоит отдельно отметить, что используемые модели дискретных моделей транзисторов и диодов были подвергнуты переработки – их внутренние параметры, такие как внутренние емкости и токи насыщения, максимально приближены к нормам для элементов, используемых в ИМС [20]. Общий вид моделей КР1533ТМ2 и КР1554ТМ2 показан на Рис. 1.31 и Рис. 1.32 соответственно.

Дополнительная переработка внутренних параметров элементов была вынужденной мерой, так как быстродействие первого варианта модели было весьма далеко от заявленного.

Заявленное быстродействие микросхемы серии КР1533TM2 составляет до 34 МГц, до подбора параметров внутренних элементов оно составляло около 40 кГц, после подбора примерно 40 МГц (см. Рис. 1.3333 и Рис. 1.3434 соответственно).

Заявленное минимальное быстродействие микросхемы серии KP1554TM2 при рабочем напряжении 5 В составляет не менее 100 МГц. До подбора параметров элементов скорость работы составляла единицы кГц, после подбора – примерно 101 МГц (Рис. 1.35).

Таким образом, одним из выводов по ходу работы станет необходимость точного подбора внутренних параметров элементов при создании развернутой модели микросхемы.

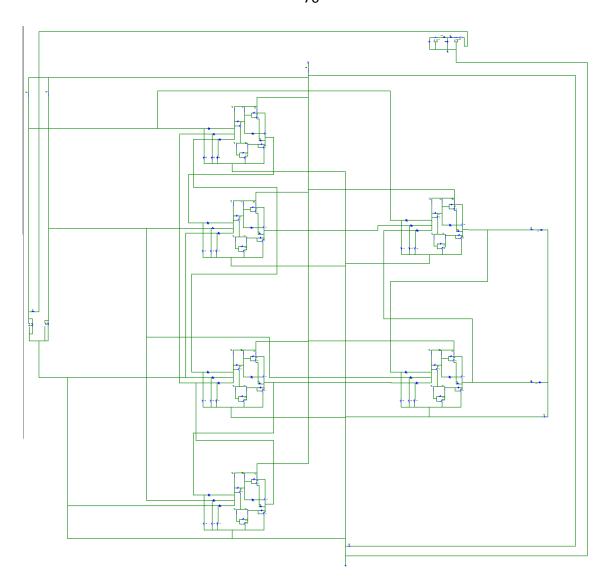


Рис. 1.31. Модель микросхемы КР1533ТМ2

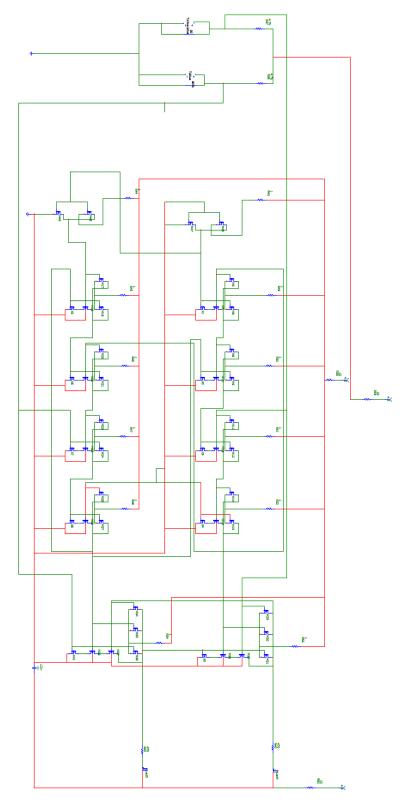


Рис. 1.32. Модель микросхемы КР1554ТМ2

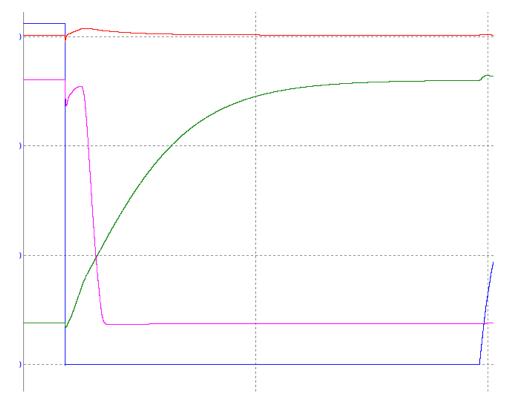


Рис. 1.33. Переключение КР1533ТМ2 до подбора параметров элементов

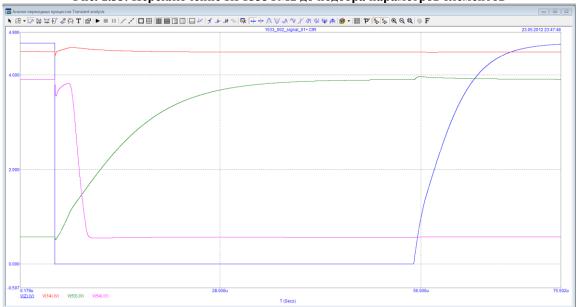


Рис. 1.34. Нормальное переключение **КР1533TM2**. Синий и красный – входы, фиолетовый и зеленый – выходы

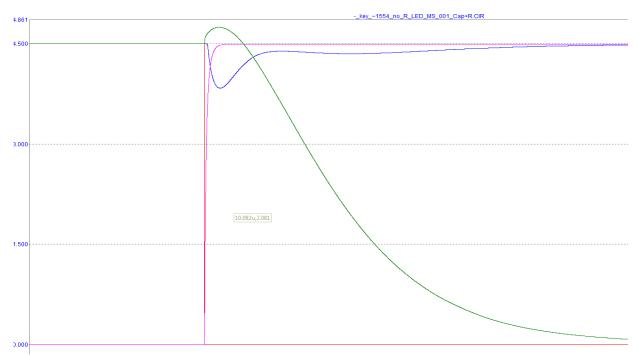


Рис. 1.35. Нормальное переключение KP1554TM2. Синий и красный – входы, фиолетовый и зеленый – выхолы.

1.5.4 Цикл испытаний КР1533ТМ2 в программе Місгосар

Цикл испытаний KP1533TM2 проводился в несколько этапов. Первый этап был обзорным — его целью являлось установить работоспособность модели микросхемы и наличие реакции на воздействие ЭСР. Подробно рассматривать данный этап не будем.

Вторым этапом был отладочный, в ходе которого были подобраны новые внутренние параметры элементов. Целью второго этапа было добиться необходимой скорости работы модели микросхемы.

Третий этап, он же и основной – это комплексное тестирование модели микросхемы KP1533TM2 на устойчивость к ЭСР.

Рассмотри представленные выше этапы подробнее.

Первый этап.

Модель КР1533ТМ2, собранная в полном соответствии с использовавшейся в Multisim схемой, запустилась с первой попытки, но, к сожалению, быстродействие оказалось на три порядка ниже заявленного в документации. Тем не менее, былј проведено пробное моделирование воздействия ЭСР. Модель микросхемы среагировала на пробный разряд. Таким образом, были соблюдены два условия корректности модели:

- соблюдение логической схемы работы ИМС,
- способность к реакции на воздействие ЭСР.

Данный факт позволил перейти ко второму этапу моделирования.

Второй этап

На втором этапе производилась отладка модели микросхемы, так как добиться корректной скорости работы с первой попытки не удалось.

В данном случае отладка свелась к уменьшению на величину от 10^3 до 10^6 раз таких параметров как:

- внутренние емкости элементов,
- токи насыщения,
- номиналы резисторов, предусмотренных ТТЛШ логикой.

Итогом стало возросшее с 40 кГц до 40 МГц быстродействие модели, так же повысилась чувствительность к контрольному воздействию ЭСР.

Таким образом, было соблюдено еще одно условие корректности модели – сохранение быстродействия, заявленного в характеристиках реальной ИМС. Что дает нам возможность перейти к третьему этапу моделирования.

Третий этап

Этот этап представляет собой развернутое исследование чувствительности созданной модели микросхемы, а так же выявление проблемных мест.

Основная масса экспериментов проводилась при использовании модели генератора ЭСР, соответствующей ГОСТ Р 51317.2.4-99. Моделирование в соответствии с MIL-STD-883H проводилось лишь дополнительно, так как каждое отдельное моделирование занимает достаточно длительный промежуток времени и во всех точках, кроме пороговых, результаты моделирования будут схожи.

Ниже приведена сводная таблица результатов эксперимента. Далее, в соответствии с таблицей, будут рассмотрены все интересный случаи.

Таблица 0.3

Сводная таблица результатов испытаний КР1533ТМ2 на чувствительность к воздействию ЭСР

| № | полярность | номинал | приложение | результат | картинка |
|----|------------|---------|------------|-----------|--|
| 1 | "+" | 8 | питание | помеха | +_pwr_8kv_001 |
| 2 | "+" | 30 | питание | сбой | +_pwr_30kv_001 |
| 3 | "+" | 100 | питание | сбой | +_pwr_100kv_001 |
| 4 | "+" | 100 | земля | помеха | +_grnd_100kv_001 |
| 5 | "+" | 1000 | земля | помеха | +_grnd_1000kv_001 +_grnd_1000kv_002 |
| 6 | "+" | 100 | вход 1 | помеха | +_input_1_100kv_001 |
| 7 | "+" | 8 | вход 2 | помеха | +_input_2_8kv_001 |
| 8 | "+" | 100 | вход 2 | сбой | +_input_2_100kv_001 |
| 9 | "+" | 8 | выход 1 | помеха | +_out_1_8kv_001 |
| 10 | "+" | 100 | выход 1 | сбой | +_out_1_100kv_001 |
| 11 | "+" | 6 | выход 2 | помеха | +_out_2_8kv_001 |
| 12 | "+" | 100 | выход 2 | сбой | +_out_2_100kv_001 |
| 13 | "_" | 8 | питание | помеха | pwr_8kv_001 |
| 14 | "_" | 100 | питание | помеха | pwr_100kv_001 pwr_100kv_002 |
| 15 | "_" | 100 | земля | помеха | grnd_100kv_001 |
| 16 | "_" | 200 | земля | помеха | grnd_200kv_001 |
| 17 | "_" | 300 | земля | сбой | grnd_300kv_001 |
| 18 | "_" | 0.25 | вход 1 | сбой | input_1_0.25kv_001 |

| | 1 | | I | ı | 1 |
|----|-----|-------|---------|--------|---|
| 19 | "_" | 0.5 | вход 1 | сбой | input_1_0.5kv_001 |
| 20 | "_" | 2 | вход 1 | сбой | input_1_2kv_001 |
| 21 | "_" | 4 | вход 1 | сбой | input_1_4kv_001 input_1_4kv_002 |
| 22 | "_" | 6 | вход 1 | сбой | input_1_6kv_001 |
| 23 | "_" | 8 | вход 1 | сбой | input_1_8kv_001 input_1_8kv_002 |
| 24 | | 100 | вход 1 | сбой | input_1_100kv_001 |
| 25 | "_" | 100 | вход 2 | помеха | input_2_100kv_001 |
| 26 | "_" | 100 | выход 1 | помеха | out_1_100kv_001 |
| 27 | "_" | 0.125 | выход 2 | сбой | out_1_0.125kv_001 out_1_0.125kv_002 |
| 28 | "_" | 0.25 | выход 2 | сбой | out_1_0.25kv_001 out_1_0.25kv_002 |
| 29 | "_" | 2 | выход 2 | сбой | out_1_2kv_001 |
| 30 | "_" | 4 | выход 2 | сбой | out_1_4kv_001 |
| 31 | "_" | 6 | выход 2 | сбой | out_1_6kv_001 |
| 32 | "_" | 8 | выход 2 | сбой | out_1_8kv_001 |
| 33 | "_" | 100 | выход 2 | сбой | out_1_100kv_001 out_1_100kv_002 out_1_100kv_003 |

Рассмотрим полученные результаты.

При положительном напряжении помехи в пределах, указанных в ГОСТ Р 51317.2.4-99 сбоя в работе модели микросхемы не происходит, лишь помеха (См. Рис. 36).

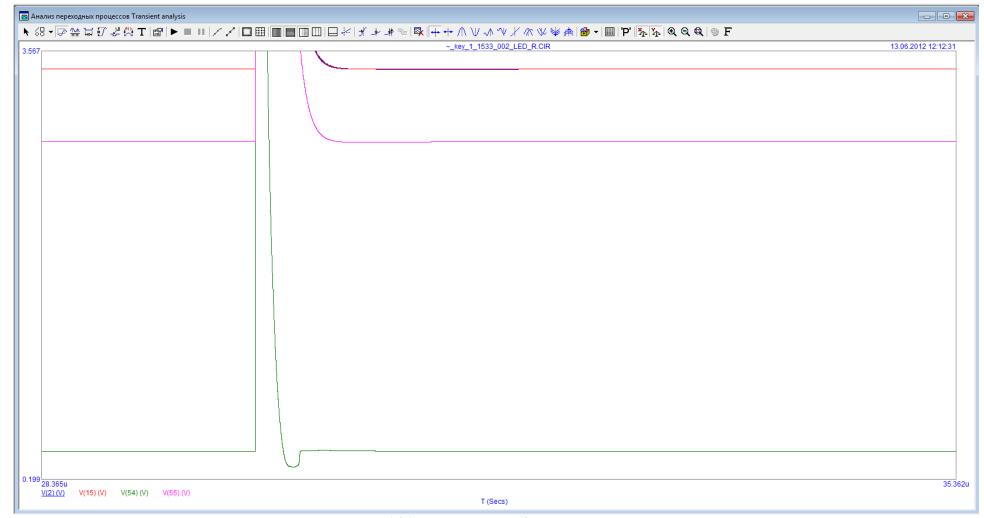


Рис. 1.36 Помеха, питание, 8кВ

Минимальное напряжение сбоя составляет около 30 кВ (См. Рис. 1.337).

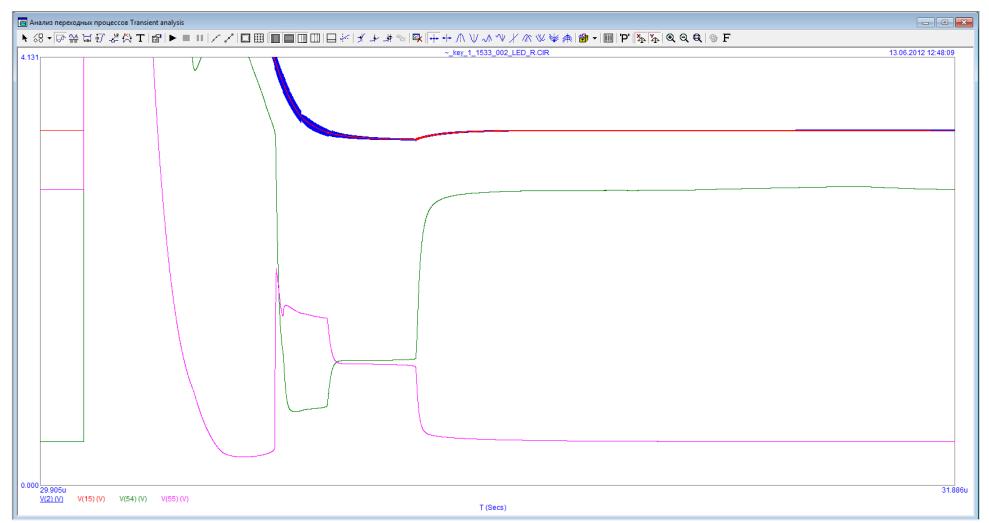


Рис. 1.37. Сбой, питание,30 кВ

При этом напряжении происходит смена логического состояния в модели ИМС, так же на входных контактах наблюдается помеха (синие и красные линии на графиках).

При положительной помехе на «землю» сбоя не происходит даже при напряжении на выходе генератора ЭСР в 1 МВ. Тем не менее, помеха при данном воздействии достаточно сильная и длительная, чтобы предположить, что при воздействии на реальную микросхему будет наблюдаться обратимый сбой в работе (См. Рис. 1.38).

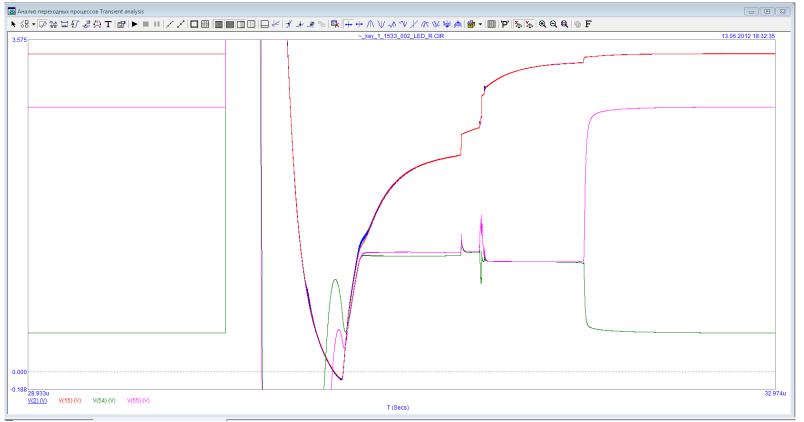


Рис. 1.38. Помеха, земля, 1 МВ

При рассмотрении характера помехи, стоит обратить внимание на то, что воздействие положительный напряжением на «землю» вызывает многоступенчатую реакцию, которая продолжается значительное (порядка 2 мкс) время после воздействия (См. Рис. 1.39).

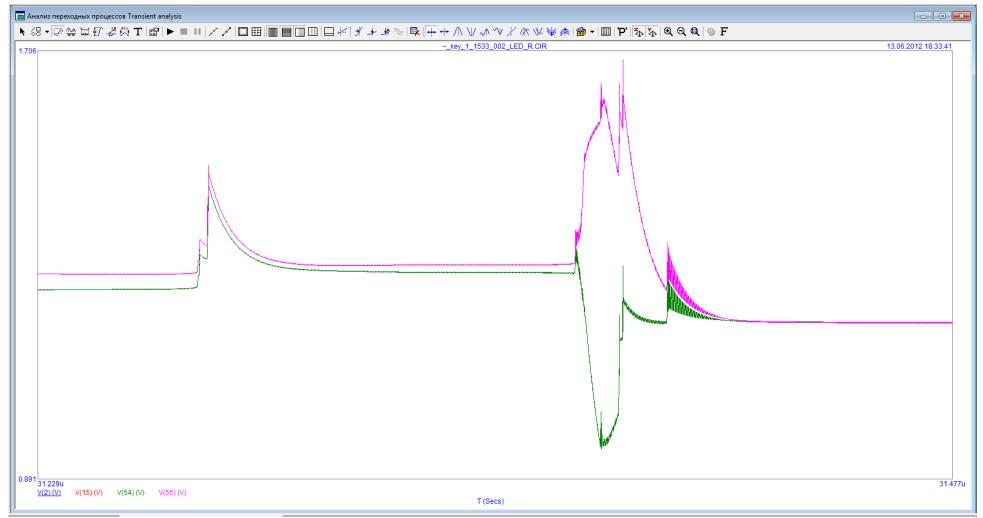


Рис. 1.39. Помеха, земля, 1 МВ

При приложении положительного напряжения помехи к информационным входам и выходам модели микросхемы в рамках ГОСТ Р 51317.2.4-99 сбоя не происходит. Сбоя в работе модели удается добиться только при напряжении на выходе генератора порядка 100 кВ. (См. Рис. 1.40 и Рис. 1.418).

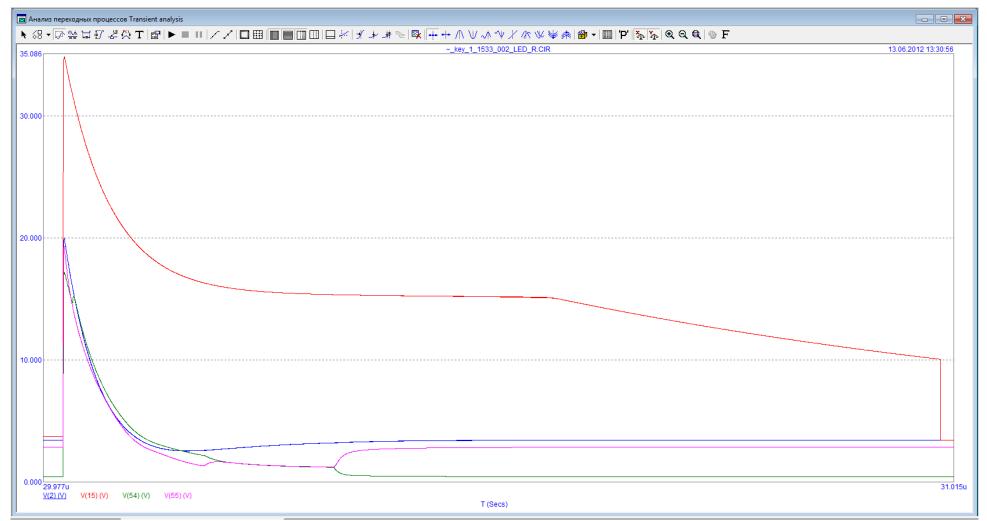


Рис. 1.40. Помеха, вход 2, 8 кВ

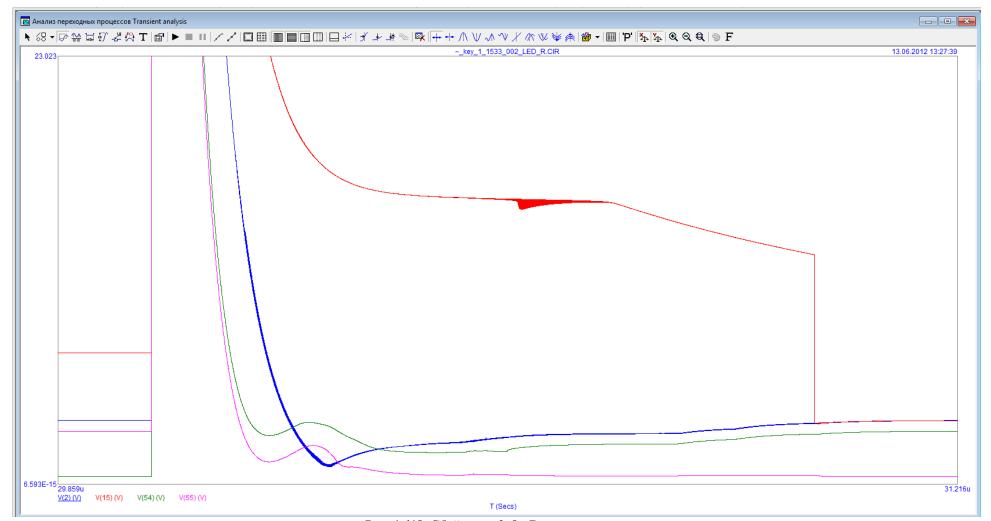


Рис. 1.418. Сбой, вход 2, 8 кВ

Итогом данной части цикла испытаний является малая чувствительность модели KP1533TM2 к воздействию положительного напряжения помехи ЭСР. Перейдем к следующему этапу испытаний – воздействию отрицательным напряжением.

Исходя из сводной таблицы, приходим к выводу, что модель фактически не реагирует на воздействие отрицательного напряжения на шину питания (См. Рис. 1.419).

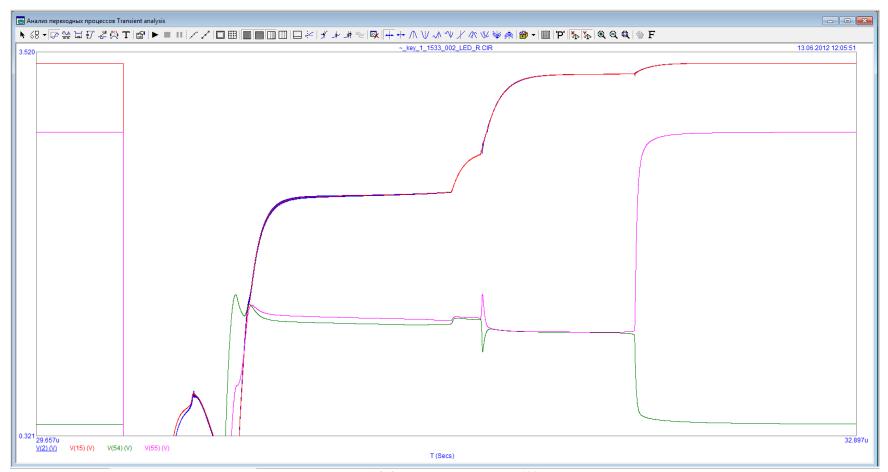


Рис. 1.419. Помеха, питание, -100 кВ

Несмотря на то, что имеет место серьезная помеха на входах и выходах модели ИМС, тем не менее, переключения выходных логических уровней не происходит. При увеличении напряжения ЭСР увеличивается длина отрезка времени, на котором наблюдается обратимый сбой, но и только.

При воздействии отрицательным напряжением помехи сбой происходит, но только при напряжении 300 кВ на выходе генератора (См. Рис.1.43).

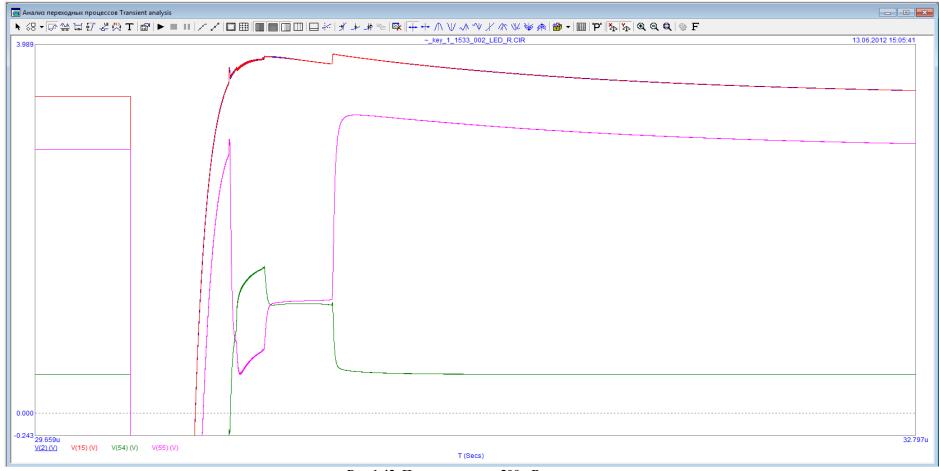


Рис.1.43. Помеха, земля, -300 кВ

Первоначально складывалось впечатление, что модель вообще не чувствительна к отрицательным напряжениям на выходе ЭСР. Однако испытания входов и выходов модели внесли ясность в ситуацию.

При воздействии на вход 1 (См. Рис. 1.04) сбой происходил уже при 250 В на выходе генератора ЭСР.

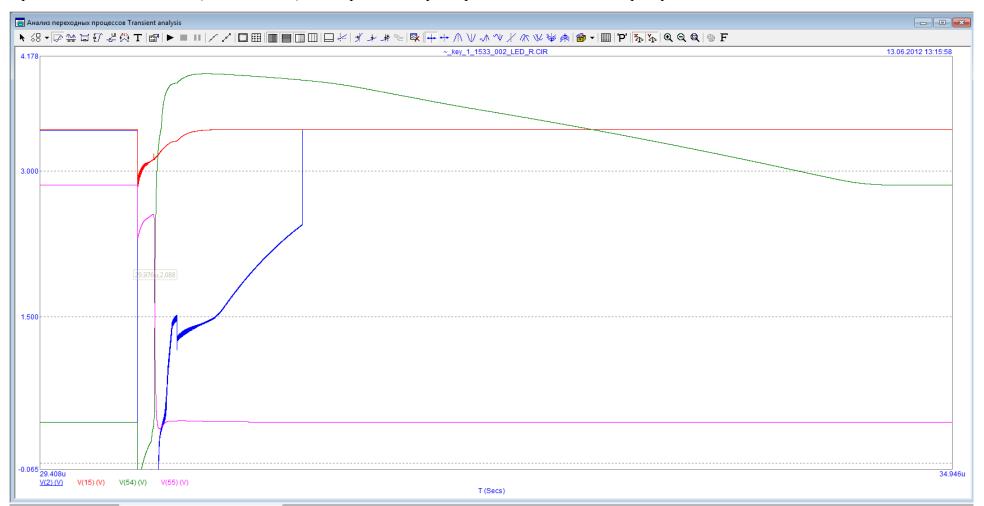


Рис. 1.04. Сбой, вход 1, 250 В

При воздействии отрицательным напряжением на вход 2 модель не проявляла склонности к обратимому или необратимому сбою даже при очень высоких напряжениях помехи (См. Рис. 1.45).

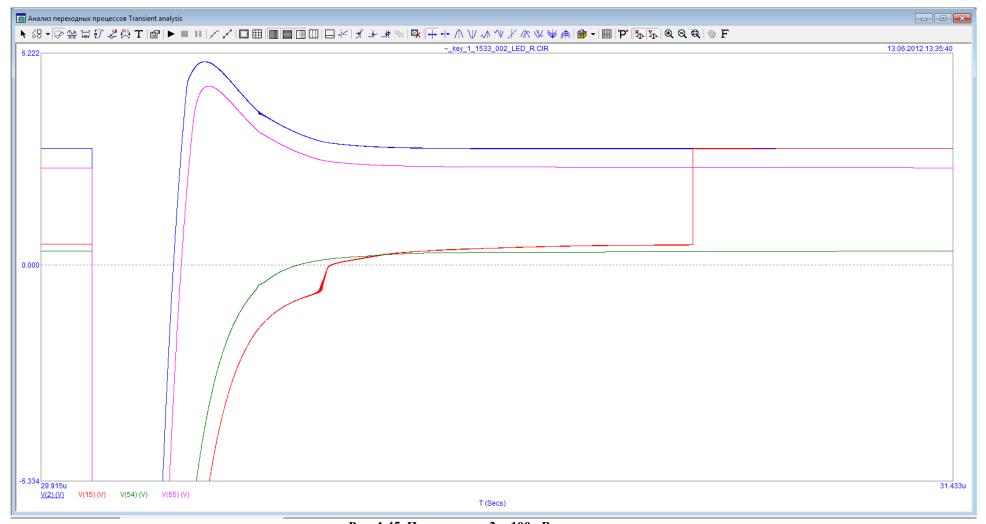


Рис. 1.45. Помеха, вход 2, -100 кВ

Точно так же, как и со входами, сложилась ситуация при приложении напряжения ЭСР к выходам микросхемы. Выход 1 оказался нечувствителен к воздействию ЭСР, в то время, как при воздействии на выход 2 напряжением в 125В происходит сбой. (См. Рис. 1.46 и Рис. 1.47).

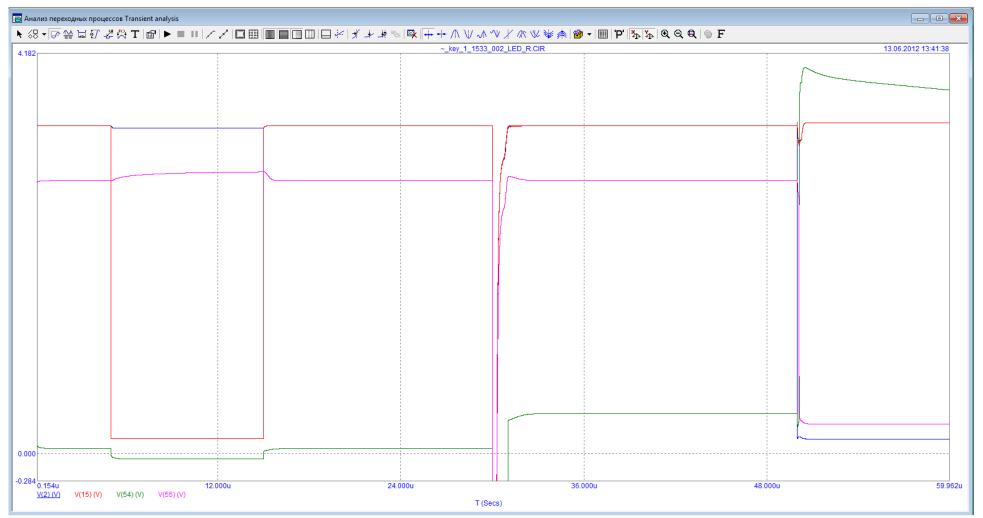


Рис. 1.46. Помеха, выход 1, -100 кВ

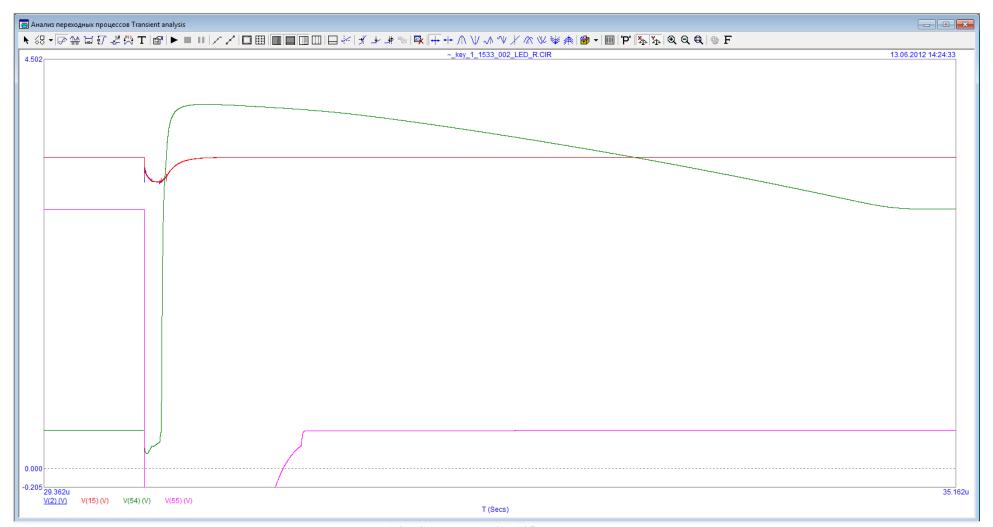


Рис. 1.47. Сбой, выход 2, -125 **B**

Стоит отметить, что воздействие напряжением ЭСР на выходы микросхемы приводило к ощутимым помехам на входах (См. Рис. 1.).

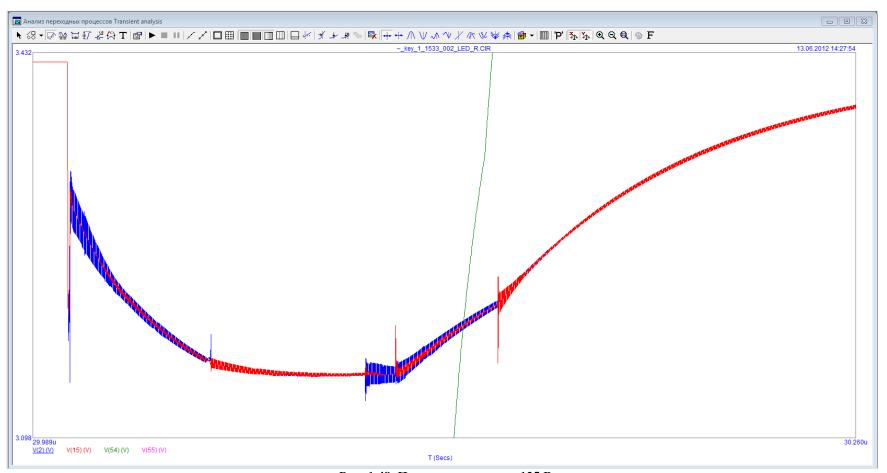


Рис. 1.48. Помехи на входах, -125 В

1.5.5 Цикл испытаний КР1554ТМ2 в программе Місгосар

Цикл испытаний KP1554TM2 проводился в несколько этапов, полностью соответствующих этапам испытания KP1533TM2.

Первый этап.

Модель КР1554ТМ2, собранная в соответствии с использовавшейся в Multisim схемой, с первой попытки не запустилась корректно и была пересобрана заново, тем не менее, быстродействие оказалось на пять порядков ниже заявленного в документации. Было проведено пробное моделирование воздействия ЭСР. Модель микросхемы среагировала на пробный разряд. Таким образом, были соблюдены два условия корректности модели:

- Соблюдение логической схемы работы ИМС
- Способность к реакции на воздействие ЭСР

Данный факт позволил перейти ко второму этапу моделирования.

Второй этап

На втором этапе производилась отладка модели микросхемы, так как добиться корректной скорости работы с первой попытки не удалось.

В данном случае отладка свелась к уменьшению на величину от 10^3 до 10^6 раз таких параметров как:

- Внутренние емкости элементов
- Токи насыщения

Итогом стало возросшее с нескольких кГц до 100МГц быстродействие модели, так же повысилась чувствительность к контрольному воздействию ЭСР.

Таким образом, было соблюдено еще одно условие корректности модели – сохранение быстродействия, заявленного в характеристиках реальной ИМС. Что дает нам возможность перейти к третьему этапу моделирования.

Третий этап

Этот этап представляет собой развернутое исследование чувствительности созданной модели микросхемы, а так же выявление проблемных мест.

Основная масса экспериментов проводилась при использовании модели генератора ЭСР, соответствующей ГОСТ Р 51317.2.4-99. Моделирование в соответствии с MIL-STD-883H проводилось лишь дополнительно, так как каждое отдельное моделирование занимает достаточно длительный промежуток времени и во всех точках, кроме пороговых, результаты эксперимента будут схожи.

Ниже приведена сводная таблица результатов эксперимента. Далее, в соответствии с таблицей, будут рассмотрены все интересные случаи.

Таблица № 3.2. Таблица 0.4

Сводная таблица результатов испытаний КР1554ТМ2 на чувствительность к воздействию ЭСР

| № | полярность | номинал | приложение | результат | картинка |
|----|------------|---------------------|------------|-------------------|--|
| 1 | "+" | 2 | питание | помеха | +_pwr_~1554_no_R_LED_MS_2kv_001.PNG |
| 2 | "+" | 4 | питание | помеха | +_pwr_~1554_no_R_LED_MS_4kv_001.PNG |
| 3 | "+" | 8 | питание | помеха | +_pwr_~1554_no_R_LED_MS_8kv_001.PNG |
| 4 | "+" | 100 | питание | помеха | +_pwr_~1554_no_R_LED_MS_100kv_001.PNG |
| 5 | "+" | 1000 | земля | помеха | +_grnd_~1554_no_R_LED_MS_100kv_001.PNG +_grnd_~1554_no_R_LED_MS_100kv_002.PNG |
| 6 | "+" | 1000 | вход 1 | помеха | +_key_1_~1554_no_R_LED_MS_1000kv_001.PNG +_key_1_~1554_no_R_LED_MS_1000kv_002.PNG |
| 7 | "+" | 8 | вход 2 | помеха | +_key_2_~1554_no_R_LED_MS_8kv_001.PNG +_key_2_~1554_no_R_LED_MS_8kv_002.PNG |
| 8 | "+" | 83 | вход 2 | сбой (минимум) | +_key_2_~1554_no_R_LED_MS_83kv_001.PNG +_key_2_~1554_no_R_LED_MS_83kv_002.PNG |
| 9 | "+" | 100 | вход 2 | сбой | +_key_2_~1554_no_R_LED_MS_100kv_001.PNG +_key_2_~1554_no_R_LED_MS_100kv_002.PNG |
| 10 | "+" | 3.58425 источник | выход 1 | помеха | +_0ut_1_~1554_no_R_LED_MS_3.58425v_001.PNG |
| 11 | "+" | 0.063 | выход 1 | сбой | +_0ut_1_~1554_no_R_LED_MS_0.063kv_001.PNG |
| 12 | "+" | 0.125 | выход 1 | сбой | +_0ut_1_~1554_no_R_LED_MS_0.125kv_001.PNG |
| 13 | "+" | 0.25 | выход 1 | сбой | +_0ut_1_~1554_no_R_LED_MS_0.25kv_001.PNG |

| 14 | "+" | 2 | выход 1 | сбой | +_0ut_1_~1554_no_R_LED_MS_2kv_001.PNG |
|----|-----|-------|---------|-------------------|---|
| 15 | "+" | 4 | выход 1 | сбой | +_0ut_1_~1554_no_R_LED_MS_4kv_001.PNG |
| 16 | "+" | 8 | выход 2 | помеха | +_0ut_2_~1554_no_R_LED_MS_8kv_001.PNG |
| 17 | "_" | 0.25 | питание | помеха | pwr_~1554_no_R_LED_MS_0.25kv_001.PNG |
| 18 | "_" | 0.5 | питание | сбой | pwr_~1554_no_R_LED_MS_0.5kv_001.PNG |
| 19 | "_" | 2 | питание | сбой | pwr_~1554_no_R_LED_MS_2kv_001.PNG - _pwr_~1554_no_R_LED_MS_2kv_002.PNG |
| 20 | "_" | 4 | питание | сбой | pwr_~1554_no_R_LED_MS_4kv_001.PNG - _pwr_~1554_no_R_LED_MS_4kv_002.PNG |
| 21 | "_" | 6 | питание | сбой | pwr_~1554_no_R_LED_MS_6kv_001.PNG - _pwr_~1554_no_R_LED_MS_6kv_002.PNG |
| 22 | "_" | 8 | питание | сбой | pwr_~1554_no_R_LED_MS_8kv_001.PNG - _pwr_~1554_no_R_LED_MS_8kv_002.PNG |
| 23 | "_" | 100 | питание | сбой | pwr_~1554_no_R_LED_MS_100kv_001.PNG - _pwr_~1554_no_R_LED_MS_100kv_002.PNG |
| 24 | "_" | 100 | земля | помеха | grnd_~1554_no_R_LED_MS_100kv_001.PNG - _grnd_~1554_no_R_LED_MS_100kv_002.PNG |
| 25 | "_" | 1000 | земля | помеха | grnd_~1554_no_R_LED_MS_1000kv_001.PNG |
| 26 | "_" | 0.125 | вход 1 | сбой | key_1_~1554_no_R_LED_MS_0.125kv_001.PNG - _key_1_~1554_no_R_LED_MS_0.125kv_002.PNG |
| 27 | "_" | 0.25 | вход 1 | сбой | key_1_~1554_no_R_LED_MS_2kv_001.PNG - _key_1_~1554_no_R_LED_MS_2kv_002.PNG |
| 28 | "_" | 0.5 | вход 2 | помеха | key_2_~1554_no_R_LED_MS_0.5kv_001.PNG - _key_2_~1554_no_R_LED_MS_0.5kv_002.PNG |
| 29 | "_" | 6 | вход 2 | сбой программы | сбой программы |
| 30 | "_" | 8 | вход 2 | сбой программы | сбой программы |

| 31 | "_" | 100 | выход 1 | помеха | 0ut_1_~1554_no_R_LED_MS_100kv_001.PNG - _0ut_1_~1554_no_R_LED_MS_100kv_002.PNG - _0ut_1_~1554_no_R_LED_MS_100kv_003.PNG |
|----|-----|-------|---------|--------|---|
| 32 | "_" | 0.063 | выход 2 | сбой | 0ut_2_~1554_no_R_LED_MS_0.063kv_001.PNG |
| 33 | "_" | 0.125 | выход 2 | сбой | 0ut_2_~1554_no_R_LED_MS_0.125kv_001.PNG |
| 34 | "_" | 0.25 | выход 2 | сбой | 0ut_2_~1554_no_R_LED_MS_0.25kv_001.PNG |
| 35 | "_" | 2 | выход 2 | сбой | 0ut_2_~1554_no_R_LED_MS_2kv_001.PNG |
| 36 | "_" | 4 | выход 2 | сбой | 0ut_2_~1554_no_R_LED_MS_4kv_001.PNG |
| 37 | "_" | 6 | выход 2 | сбой | 0ut_2_~1554_no_R_LED_MS_6kv_001.PNG |
| 38 | "_" | 8 | выход 2 | сбой | 0ut_2_~1554_no_R_LED_MS_8kv_001.PNG |

Сразу стоит отметить, что полученные в данном разделе результаты значительно отличаются от результатов моделирования КР1533TM2.

При воздействии положительным напряжение ЭСР на шины питания и «земли» модель микросхемы продемонстрировала полную нечувствительность к данному типу помех (См. Рис. 1.49 и Рис. 1.50).

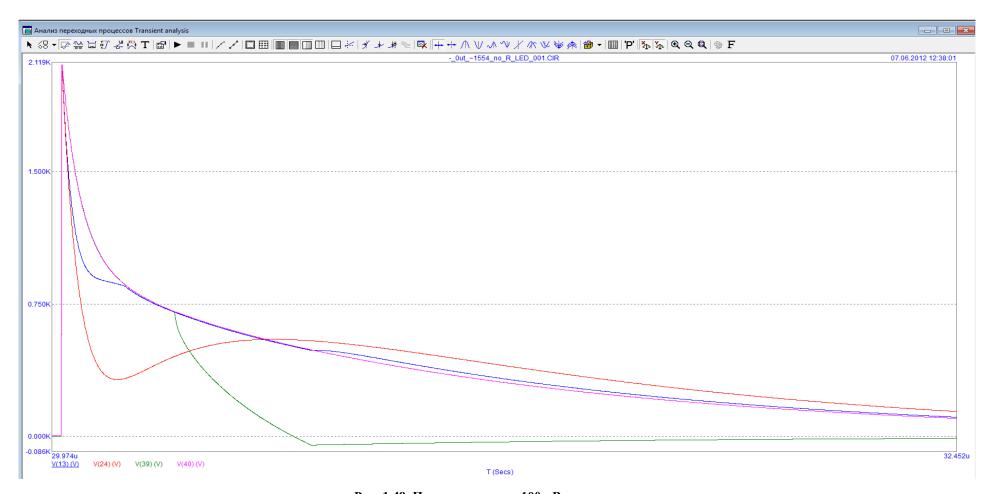


Рис. 1.49. Помеха, питание, 100 кВ

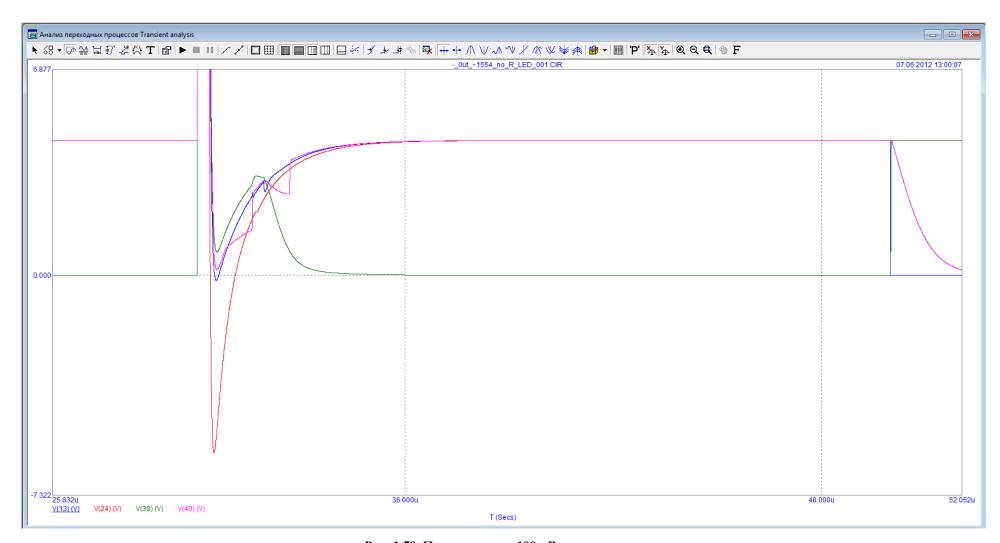


Рис. 1.50. Помеха, земля, 100 кВ

Так же нечувствительным к положительному напряжению оказались вход 1 и выход 2. Вход 2 имеет низкую чувствительность – сбой происходит минимум при 100 кВ. Выход 1 оказался самым чувствительным к воздействию. Сбой наступал уже при нескольких вольтах напряжения ЭСР (см. Рис. 1.51).

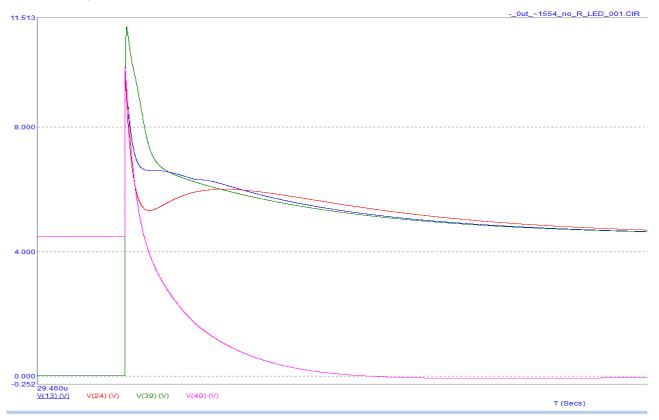


Рис. 1.51. Сбой, выход 1, 63 В

Минимальный уровень напряжения источника в генераторе ЭСР, при котором сбой не происходит составил 3.58425B, уже при 3.5843B происходит сбой (см. Рис. 1.52).

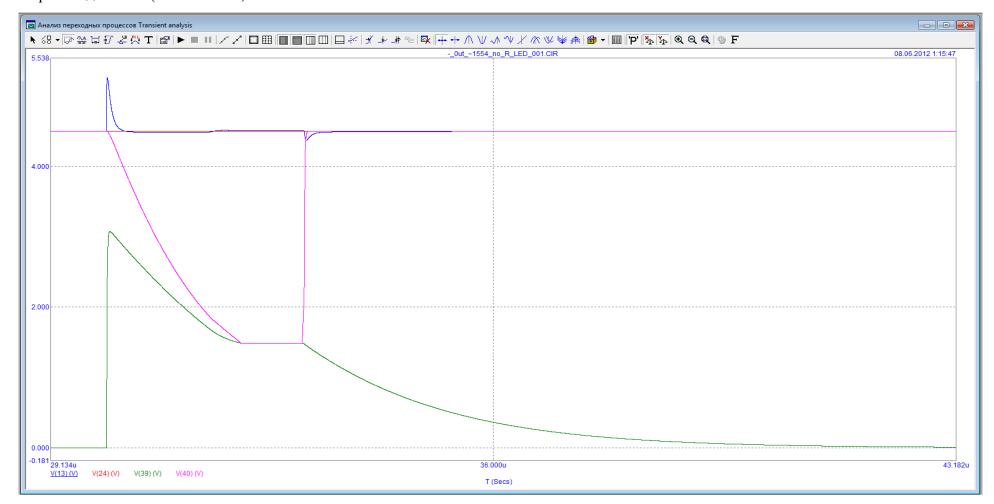


Рис. 1.52. Помеха, выход 1, 3.58425 В

При воздействии отрицательным напряжением шина питания оказалась крайне чувствительной, минимальное значение напряжения ЭСР для обратимого сбоя 250 В, при 500В происходит необратимы сбой (См. Рис. 1.52053 и Рис. 1.5054).

При этом шина земли оказалась нечувствительная и при напряжении помехи 1МВ сбоя не происходит.

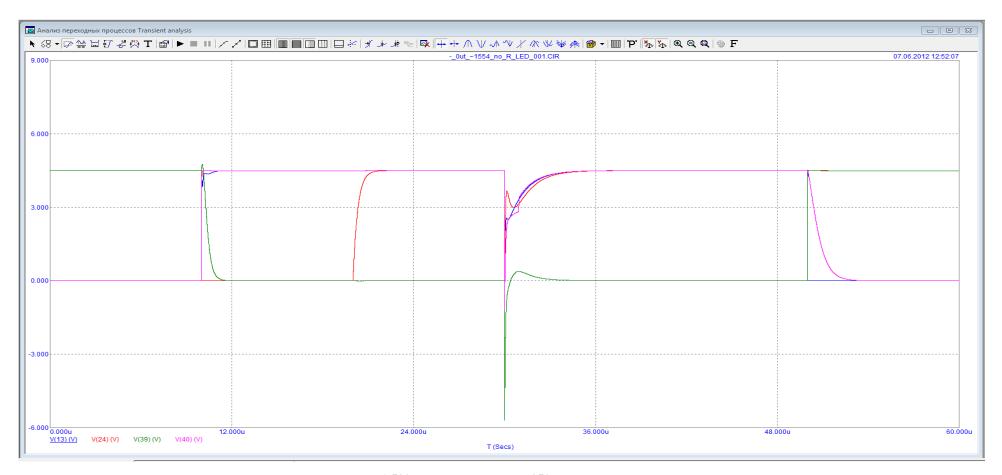


Рис. 1.520. Помеха, питание, -250 В

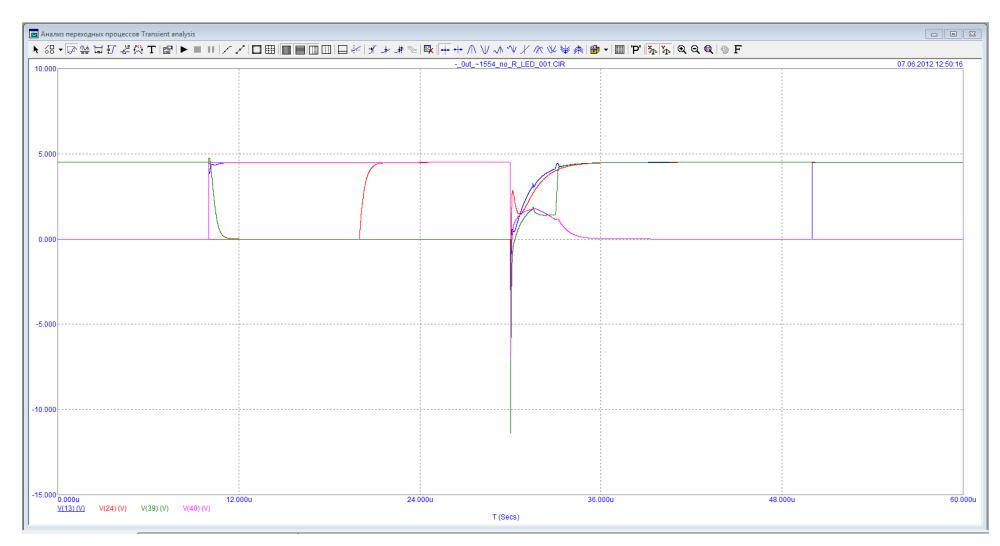


Рис. 1.50. Сбой, питание, -500 В

При испытаниях устойчивости входов модели была обнаружена неприятная особенность – при воздействии помехи с напряжением более 250 В на вход 1 происходит сбой программы без выведения информации об ошибке. Во временном диапазоне сбой происходит как раз при попытке рассчитать итог воздействия ЭСР. Для входа 2 такая же ситуация складывается при приложении напряжения более 500В. На данном этапе установить причины сбоя и устранить его не представляется возможным, так как Місгосар не выводит каких-либо сообщений об ошибке. Тем не менее, удалось установить, что вход 1 чувствителен к напряжению помехи уже в 125 В (См. Рис. 1.). Вход 2 оказался устойчив к максимальному доступному для расчётов напряжению помехи в 500 В (См. Рис. 1.56).

Выходы в данном эксперименте проявили схожие параметры устойчивости: выход 2 был устойчив при 100 кВ, а при воздействии на вход 1 помехи в 60 В происходит сбой (См. Рис. 1.2157и Рис. 1.58).

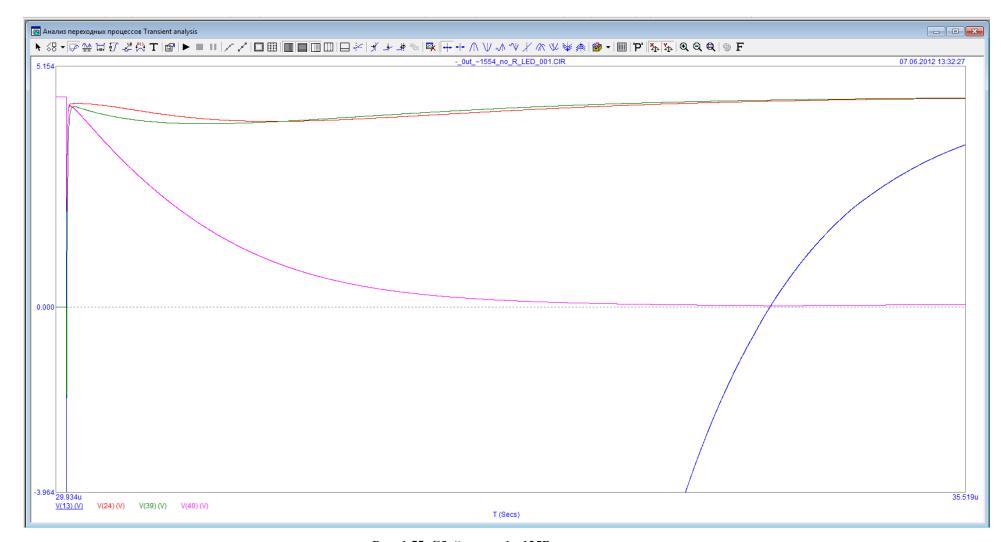


Рис. 1.55. Сбой, ключ 1, -125В

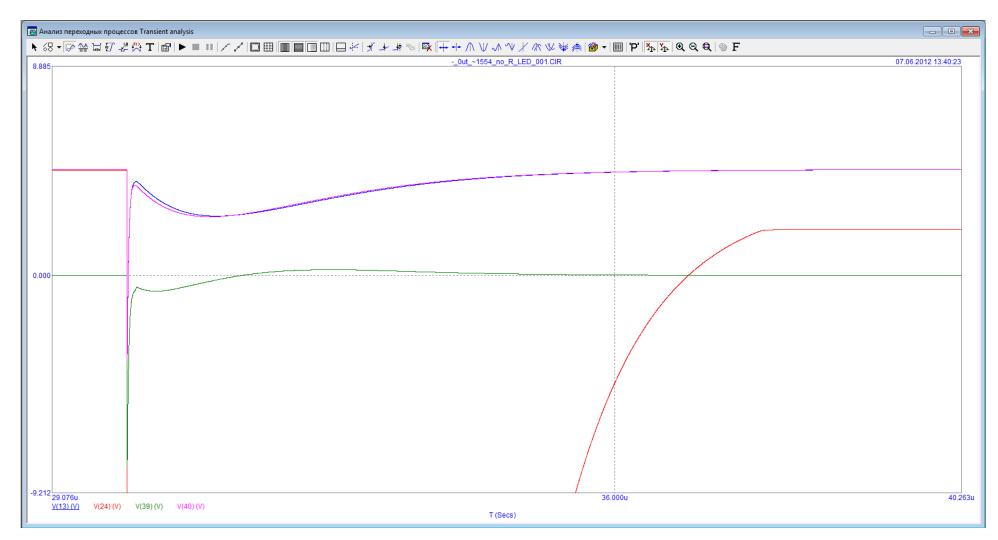


Рис. 1.56. Помеха, ключ 2, -500 B

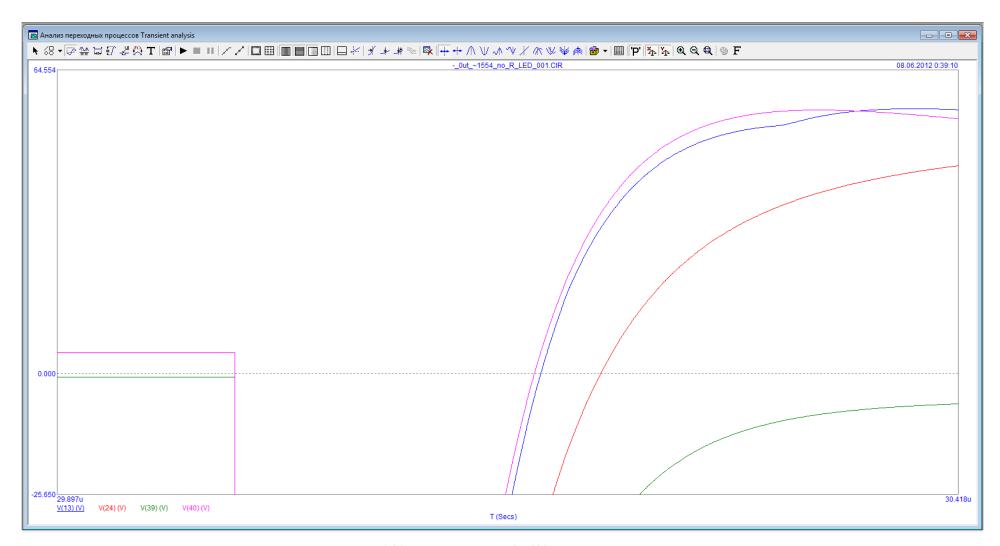


Рис. 1.217. Помеха, выход 1, -100 кВ

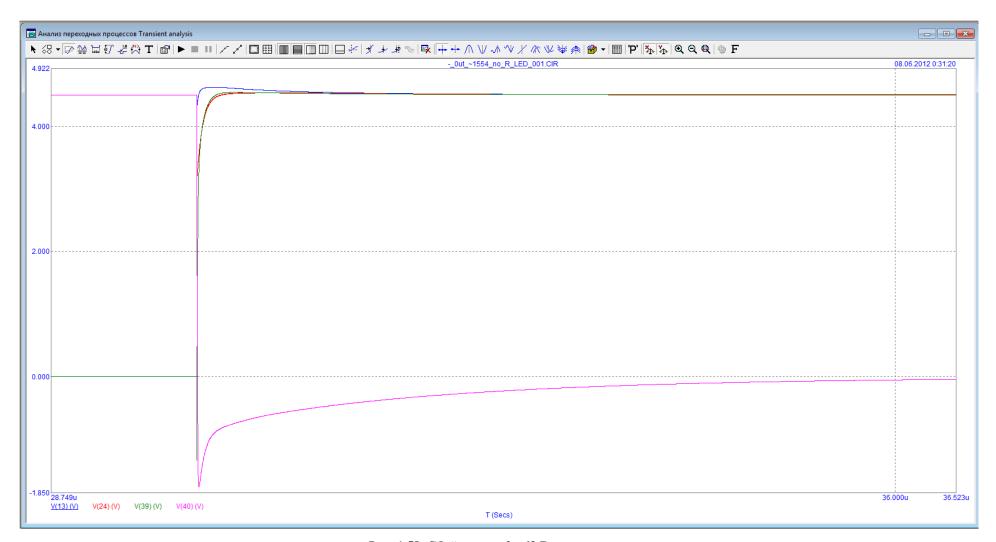


Рис. 1.58. Сбой, выход 2, -63 В

1.5.6 Цикл испытаний КР1554TM2 и КР1533TM2в программе Microcap с применением простых мер защиты от ЭСР

Последним этапом моделирования является проведение виртуальных испытаний по контрольным точкам с применением различных средств защиты от ЭСР.

Рассмотрим методы защиты, которые предполагалось первоначально использовать для моделирования:

- Развязывающие конденсаторы различной емкости. Данная защиты будет рассмотрена ниже, но она эффективна лишь при приложении ЭСР к шине питания ИМС.
- Резисторы на входах и выходах. Данный способ защиты не будет рассмотрен, так как моделирование показало либо полную несостоятельность данного метода, либо сбои в работе микросхемы (в зависимости от номинала резисторов).

При использовании развязывающих конденсаторов емкостью 1 нФ модель микросхемы KP1533TM2 проявила устойчивость к воздействию положительного напряжения ЭСР амплитудой до 10 MB, ранее сбой происходил при 30 кВ.

При использовании развязывающих конденсаторов емкостью 100 нФ модель микросхемы КР1554TM2 проявила устойчивость к воздействию положительного напряжения ЭСР амплитудой до 2 кВ, ранее сбой происходил при 500 В. Проверить устойчивость при больших напряжениях не представляется возможным, так как происходит отказ программы, как в случае с воздействием напряжениями порядка нескольких кВ на входы КР1554TM2

В ходе эксперимента были установлены следующие интересные особенности функционирования программы Місгосар 9.

Программа позволяет моделировать с различным минимальным шагом расчетов и результаты при этом могут существенно отличаться. На Рис. 1.59, 1.60, 1.61 показано моделирование воздействия на КР1533ТМ2 при точности расчета 1 нс, 500 пс и 100 пс соответственно. Разница очень существенная: при расчете с точностью 1нс и 500 пс программа показывает наличие резонансных явлений на информационных входах микросхемы, однако, при увеличении точности расчетов видно, что это ложная информация.

Необходимость в маленьком минимальном шаге расчетов порождает следующую проблему — большая ресурсоемкость вычислений. Для обсчета воздействия на KP1554TM2 и вывода четырех графиков (2 информационных входа и 2 информационных выхода) машине на базе процессора Core 2 Duo необходимо около 30–35 минут, в зависимости от условий эксперимента. Тем не менее, для современных вычислительных станций данная задача не является чрезмерно большой. Отсюда следует вывод, что

применение моделирования на этапе проектирования ЭС поможет существенно удешевить разработку последних за счет следующих факторов:

- проектирование эффективной архитектуры, в которой защита от ЭСР реализована без лишней избыточности
- проектирование ЭС, устойчивость которых к ЭСР хорошо прогнозируема
- сокращение цикла натурных испытаний

Отдельно стоит отметить, что используемые программы не моделируют взаимное расположение элементов и не моделируют процессы, происходящие внутри элементов.

Моделирование при применении параметров ЭСР, описанных в MIL-STD-883H [21], дали точно такие же результаты, как и при моделировании по параметрам ГОСТ Р 51317.4.2-99.

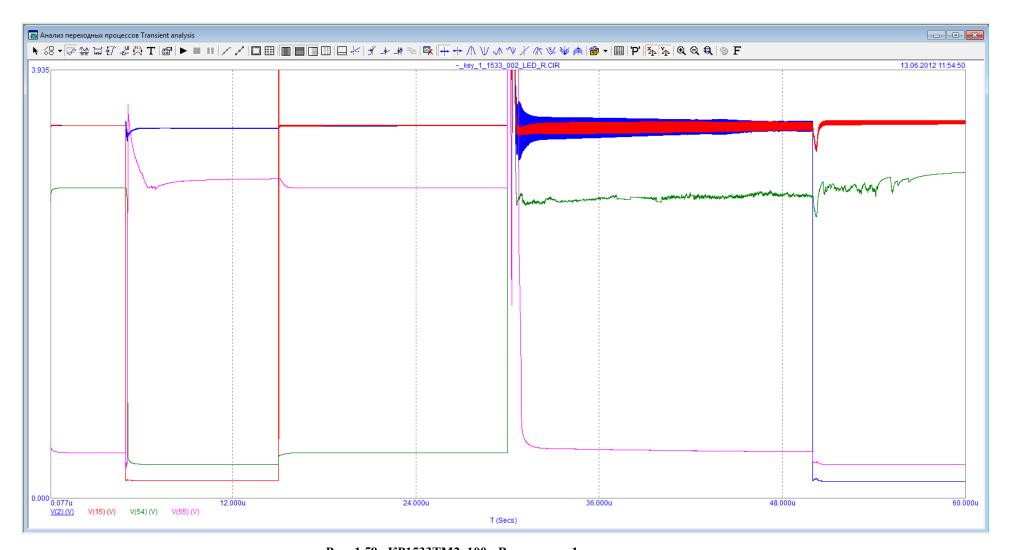


Рис. 1.59. КР1533ТМ2, 100 кВ, точность 1 нс

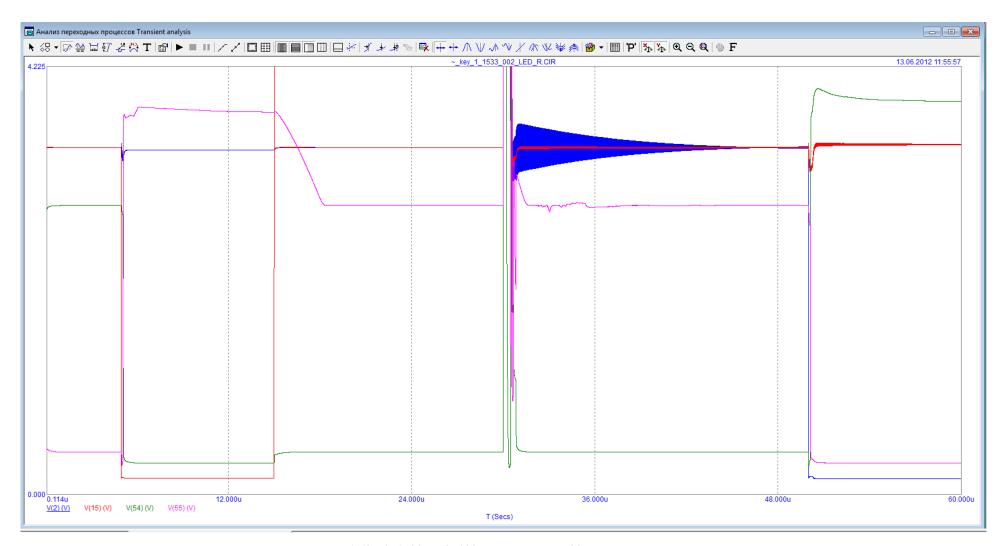


Рис. 1.60. КР1533ТМ2, 100 кВ, точность 500 пс

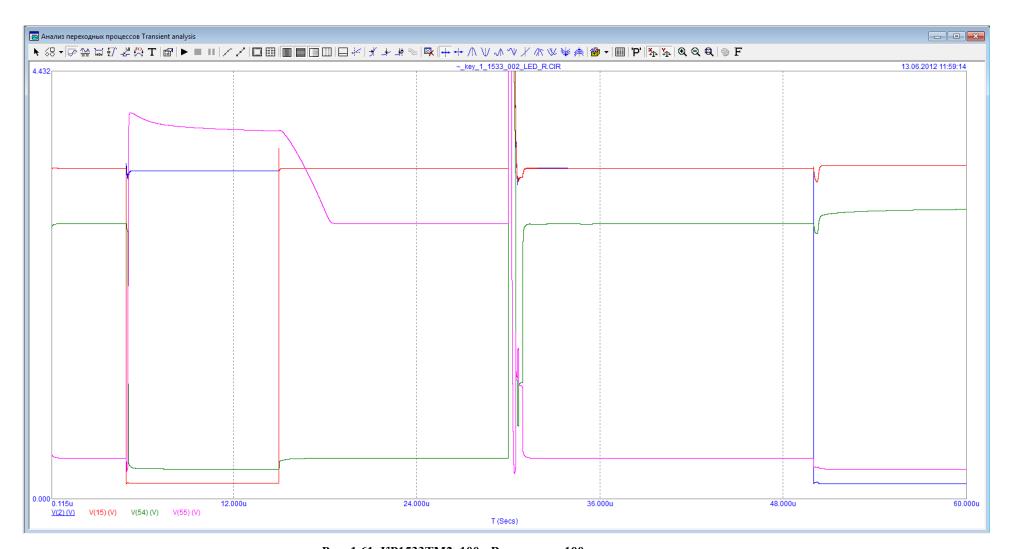


Рис. 1.61. КР1533ТМ2, 100 кВ, точность 100 пс

1.6 Обзор встроенных средств защиты интегральных микросхем от ЭСР

1.6.1 Базовые средства защиты ИМС. Принцип работы

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

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

В принципе, существует три способа защиты ИС и соответственно РЭА от повреждения и помех при воздействии ЭСР. Это предупреждения возникновения ЭСР, предупреждение попадания ЭСЗ на ИС и аппаратуру и увеличение стойкости аппаратуры и её комплектующих изделий к воздействию ЭСР. Первые два способа отнесём к внешним или коллективным мерам защиты от воздействия ЭСР. В этой главе рассмотрим подробно встроенные методы защиты ИС, преимущественно КМОП, от ЭСР.

Как показывает практика, применяемые внешние меры защиты ИС от ЭСР полностью не исключают возможности повреждения схем. Поэтому при обязательном применении мер внешней (коллективной) защиты, основным средством защиты ИС от ЭСР является так называемая встроенная защита, то есть применение защитных схем, выполненных на кристалле ИС в едином технологическом процессе. КМОП-структуры без защиты очень легко пробиваются статическим электричеством, так как структура затвор-оксид-подложка представляет собой конденсатор с очень тонким диэлектриком (до 1 нм). При небольшом перенапряжении конденсатор пробивается, и КМОП-структура выходит из строя. Даже при повышении порога чувствительности ИС к ЭСР посредством конструктивно-технологических решений, встроенная защита часто оказывается необходимой. На самом деле в КМОП-структуры вводится большое число защитных структур. Базовый принцип защиты ИС от воздействия ЭСР показан на Рис.22.62.

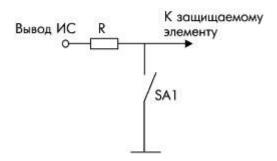


Рис.22.62. Базовый принцип защиты ИС от ЭСР

При ЭСР срабатывает двуполярный ключ SA1, и ток разряда отводится на шину питания или земли. Кроме того, часть заряда рассеивается на резисторе *R*. Идеальная защита достигается, если сопротивление ключа во включенном состоянии и время его включения равны нулю. В реальных ИС в качестве таких шунтов применяются различные элементы: диоды, транзисторы или более сложные схемы.

Важное требование к защитным структурам - условие применения защитных схем - не ухудшать параметры защищаемой ИС. Также есть еще ряд требований:

- они должны иметь небольшую площадь;
- эффективно ограничивать напряжение разряда, подаваемого на схему;
- шунтировать напряжение и токи перегрузки, возникающие при ЭСР;
- ограничивать физическую область схемы на кристалле, на которую воздействует ЭСР;
- иметь максимально быстрое время срабатывания и вносить минимальное время задержки в нормальную работу ИС в диапазоне изменений питающего напряжения.

Основными элементами защиты являются диодная схема защиты и схема защиты на КМОП-транзисторах (Рис. 1.63). Схемы обеспечивают быстрый отвод тока и рассеивание тепла [6].

Также существуют следующие элементы защиты [7]:

- n-MOП транзистор с заземлённым затвором (Grounded Gate NMOS Transistor, GGNMOST);
- n-MOП транзистор с толстым подзатворным окислом (Thick Field Oxide, TFO);
- устройство, основанное на тиристорном эффекте (Silicon-Controlled Rectifier, SCR);
- устройство, основанное на эффекте смыкания областей пространственного заряда (Punchthrough-Induced Protection Element, PIPE).

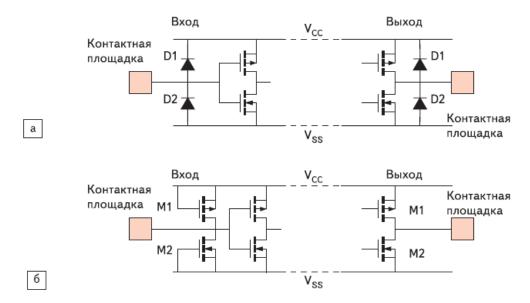


Рис. 1.63. Наиболее популярные схемы защиты от ЭСР: а) диодная; б) на КМОП-транзисторах

Представленная на Рис. 1.63, б схема защиты состоит из n-МОП транзистора с заземлённым затвором (GGNMOST) и из p-МОП транзистора с затвором, соединенным с шиной питания. Их действие одинаково, с той лишь разницей, что они предназначены для защиты внутренней схемы от ЭСР разной полярности. Но защита от ЭСР с отрицательным напряжением будет менее эффективна, чем от ЭСР с положительным напряжением. Это происходит из-за того, что у GGNMOST основные носители заряда — электроны и их подвижность выше, чем у дырок. Отсюда быстродействие GGNMOST выше, чем у p-МОП транзистора. Поэтому GGNMOST будет быстрее отводить стрессовый ток, вызванный разрядом с отрицательным напряжением.

Ниже на Рис. 1.64 представлены эквивалентные схемы защиты, представляющие собой комбинации вышеприведенных элементов [5].

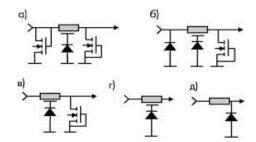


Рис. 1.64. Схемы защиты от ЭСР

Приведённые схемы сравнивались в отношении защитного действия. Результаты анализа приведены на Рис. 1.60, из которого видно, что при добавлении в схему новых элементов имеет место улучшение защитного действия структуры.

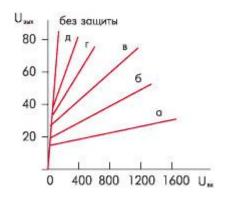


Рис. 1.60. Результаты анализа защитных схем

В *Таблица5*.7 представлены основные отечественные защитные схемы для МОП и КМОП ИС [5].

Основные защитные схемы отечественных серийных МОП ИС

Таблица5.7

| Nº | Схема защиты | Технология | Стойкость ИС к ЭСР по ТУ, В | Площадь ячейки, нм^2 | Пример ИС | Примечание |
|----|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------|---|---|
| 1 | Uпит ∨VD1 100-750 Ом ∨VD2 | КМОП | 200 2000-3000* | 3000-10000 | KP1054PP1, KP537PV3A, KA1835PE1 | Одновременно защищают все входы |
| 2 | Uпит 500 Ом УD1 УООТ | КМОП, р-МОП | 150 1500* | 2000 | К561С1, К561Л9, К561ЛР8, К537РФ6, КР573РТ5 | |
| 3 | 200 OM | КМОП | 200 1000* | 2000 | K1868BE1 | |
| 4 | 750 OM 750 OM 750 OM | КМОП | 200 | 10 000 | M1623PT1, M1623PT2 | |
| 5 | Vпит | КМОП | 150 | 10 000 | 1565ИП7, 1564ИР8, 1564ТЛ2, 1564ТМ5, KA1835PE1, 1564ИВ3 | Одновременно защищают все входы и входы/выходы |
| 6 | Uпит VD1 500 Ом VD2 VD4 | КМОП | 4000 | 24 4000 | K1554 | Одновременно защищают все входы |

Для некоторых схем приведено полученное экспериментально напряжение повреждения ЭСР защитных схем. Первая схема с использованием диодов наиболее часто применяется для защиты ИС. При воздействии ЭСР, в зависимости от полярности, открывается один из диодов, и энергия разряда уходит на шину питания или земли. Данная схема обладает невысокими защитными свойствами и неравномерностью протекания тока в рабочем режиме, что существенно снижает её защитные свойства. Защитные схемы 2 и 3 являются упрощёнными аналогами схемы 1. В схемах 4 и 5 для улучшения защитных свойств использованы соответственно диод и МОП-транзистор. В схеме 6 значительное увеличение площади защитной ячейки и применение распределённой структуры диодов позволило повысить стойкость ИС до 4000 В.

Используемые в настоящее время защитные схемы серийных ИС по ряду параметров (стойкости к ЭСР, используемой площади и так далее) не удовлетворяют изготовителей ИС. Поэтому ведётся интенсивная работа как по поиску новых схем защиты, имеющих повышенную стойкость к ЭСР без значительного увеличения площади кристалла, так и по модернизации используемых схем защиты.

Опишем дальше принцип действия некоторых защитных элементов.

Элемент зашиты GGNMOST

На Рис. 1.66 показана структура этого элемента. Опишем его принцип действия. Большое напряжение ЭСР, приложенного к контактной площадке, приводит к генерации дырочного тока в области обратносмещённого перехода стока п-МОП транзистора, который течёт в подложку. Этот ток повышает локальный потенциал подложки за счёт её сопротивления. При определённом напряжении первого пробоя *Vt1*, поданном на вход, начинает работать паразитный латеральный биполярный п-р-п-транзистор, показанный на Рис. 1.67 Под действием напряжения он защелкивается и сразу же начинает работать в низкоомной области. После вступления в низкоомную область ВАХ транзистор начинает проводить большую часть тока стока, не допуская его в защищаемое устройство. Принцип действия латерального биполярного транзистора используется также и в биполярной технологии [5].

Одним из важных аспектов работы $nMO\Pi$ -транзистора во время ЭСР является время его включения. Оно определяется временем пролета базы t_{be} паразитного биполярного транзистора. При длине канала менее 1 мкм время включения биполярного транзистора составляет менее 250 пс, в то время как время роста ЭСР-стресса по модели НВМ и по модели ММ составляет более 1 нс. В этом случае время включения паразитного биполярного транзистора можно не принимать во внимание. Паразитный биполярный

транзистор может не включится при воздействии электростатического разряда по модели СDM, время роста импульса которого может быть меньше 250 пс [8].

Также важно отметить, что по сравнению с $nMO\Pi$ -транзистором, $pMO\Pi$ -транзистор не переходит в низкоомную область при воздействии стресса. Это объясняется низкой подвижностью дырок и низким коэффициентом передачи по току β у латерального pnp-транзистора [8].

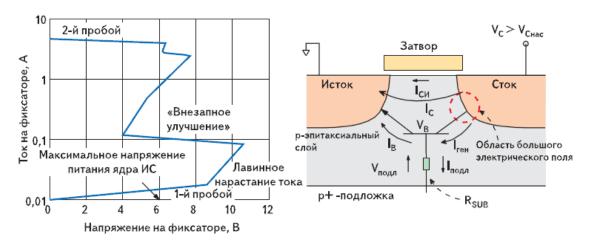


Рис. 1.66. Латеральный биполярный n-p-n-транзистор в составе элемента GGNMOST и его BAX

n-МОП транзистор с толстым подзатворным окислом (TFO)

Затвор ТFO объединен со стоком, но оказывает малое влияние на его ток. Принцип работы TFO аналогичен принципу работы транзистора с заземленным затвором, с той лишь разницей, что TFO может проводить больший ток. Обычно TFO используют вместе с GGNMOST, где второй транзистор повышает локальный потенциал подложки и инициирует аналогичный пробой первого транзистора, который отводит большую часть тока [7]. Схема совместного использования TFO и GGNMOST показана на Рис. 1.237. Схема совместного использования TFO и GGNMOST.

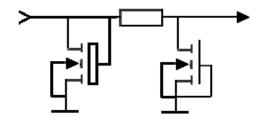


Рис. 1.237. Схема совместного использования TFO и GGNMOST

Устройство, основанное на тиристорном эффекте (SCR)

При подаче положительного напряжения на карман диод карман-подложка находится в запертом состоянии. При его пробое на сопротивлениях кармана и подложки падают напряжения, которые открывают оба биполярных транзистора и стрессовый ток

отводится на контакт земли [7]. Структура элемента показана на Рис. 1.68. Структура элемента SCR.

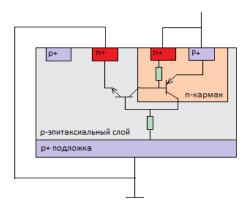


Рис. 1.68. Структура элемента SCR

1.6.2 Средства защиты от ЭСР в технологии КНИ

Так как требования к скорости работы СБИС непрерывно растут, всё более привлекательной становится КМОП-технология Кремний-На-Изоляторе (КНИ, Silicon-On-Insulator, SOI). С помощью изоляции схемных элементов технология КНИ исключает эффект защелки через подложку и обеспечивает уменьшение емкости переходов. Это снижение паразитных емкостей позволяет такой ИС работать с большей скоростью по сравнению с аналогичной ИС в традиционной КМОП-технологии при одинаковых размерах элементов. В КНИ КМОП-технологии улучшаются характеристики короткоканального транзистора, возможна большая плотность элементов в устройстве, технологические процессы упрощаются по сравнению с традиционной технологией.

На фоне быстрого развития технологии КНИ защита от ЭСР становится главным вопросом надежности устройства. В традиционной КМОП-технологии на монолитной подложке для контактных площадок была достигнута хорошая защита от ЭСР, но использование многих таких защитных схем невозможно в КНИ-технологии [9]. Например, невозможным становится использование устройств ТГО. Принципиальная особенность КНИ-технологии состоит в том, что отсутствует возможность формировать р/п-переходы с большой площадью и низким последовательным сопротивлением, так как толщина рабочей пленки кремния обычно не превышает 2000 А. Поэтому разработка схем защиты контактных площадок от ЭСР в КНИ-технологии является новой научнопрактической задачей. В работе [9] были описаны субмикронные КМОП-буферы, состоящие из многоканальных транзисторов с эффективной шириной канала 250 мкм. Были проведены исследования двух вариантов конструкции с заземленной и незафиксированной подложкой. Характеристики таких буферов представлены на Рис.

1.69. Для этих двух случаев пробойные характеристики буферов сильно отличаются, но так как для большинства технологий используется незафиксированная подложка для КНИ-структур, то именно этот вариант следует рассматривать как основной. Для объективного сравнения характеристик устройства обоих типов (традиционной КМОПтехнологии и КНИ технологии), они реализуются на одной и той же подложке. Традиционный КМОП-буфер создается после стравливания изолирующего окисла, как показано на Рис. 1.,а.

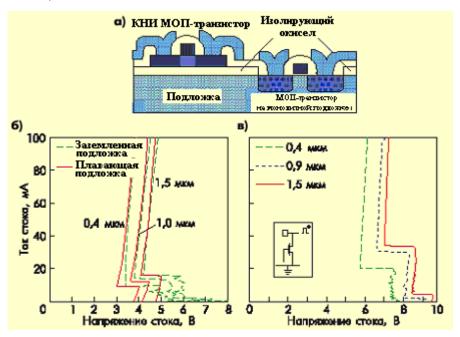


Рис. 1.69. Структура защитных структур для КНИ (а), ВАХ КНИ буферов с заземленной и незафиксированной подложкой (б), ВАХ буферов традиционной КМОП-технологии с различной длиной канала транзисторов (в)

Стандартным устройством защиты от положительного ЭСР -стресса является пМОПтранзистор, работающий в низкоомном режиме. На Рис. 1.69,6 и Рис. 1.69,8 изображены пробойные характеристики буферов для КНИ и КМОП на монолитной подложке. В обоих случаях наблюдаются ВАХ с двумя участками snapback [9]. Напряжение вступления в режим snapback для КНИ пМОП-транзистора с незафиксированным потенциалом подложки ниже, чем для КНИ-транзистора с заземленной подложкой. Однако уровень напряжения для поддержания стрессового тока мало зависит от потенциала подложки. Приблизительно одинаковый уровень защищенности от ЭСР будет обеспечиваться в обоих случаях. Второй режим snapback для пМОП КНИ (независимо от потенциала подложки) возникает при меньшем стрессовом токе и меньшем напряжении, чем для пМОП-транзистора на монолитной подложке. После второго пробоя происходит локализация стрессового тока из-за отрицательной дифференциальной проводимости в этой области, поэтому снижение значения тока второго пробоя в КНИ-структуре ведет к

более сильному локальному разогреву элемента и снижает защищенность от ЭСР. Это справедливо, так как теплопроводность кремния намного выше, чем теплопроводность SiO2, который полностью окружает активную область кремния в КНИ КМОП-буферах.

КНИ-буферы способны выдерживать положительный ЭСР по НВМ-модели до 580 В при ширине канала 250 мкм, что в два раза меньше, чем защищенность традиционных КМОП-буферов.

В традиционных КМОП-буферах ЭСР отрицательной полярности поглощается открытым диодом сток-подложка. Это позволяет транзистору поддерживать более высокие (на 300 В в данном случае) стрессовые напряжения по сравнению с положительным ESD. Однако в КНИ-технологии недоступны вертикальные р-п-переходы с большой площадью, и путь стрессового тока проходит через тонкую (менее 2000 А) пленку кремния. Из-за неполноценной работы паразитного биполярного транзистора в КНИ во время отрицательного ЭСР стрессовый ток проходит через пМОП-транзистор, работающий в диодном включении. Так как сопротивление транзистора в этом режиме относительно велико, то при высокой плотности тока в пленке кремния возникает сильный локальный разогрев элемента. Это приводит к тому, что защищенность выходных буферов КНИ по отношению к отрицательному ЭСР много ниже, чем в случае положительного разряда.

Экспериментальные данные показывают, что среднее ЭСР-напряжение, которое может выдержать КНИ пМОП-транзистор во время отрицательного разряда, приблизительно на 10 % меньше, чем для положительного разряда, и не зависит от потенциала подложки.

Эти результаты показывают, что защищенность КНИ КМОП-буферов от ЭСР ограничена стойкостью элемента по отношению к отрицательному разряду. Чтобы улучшить защищенность КНИ КМОП-буферов от отрицательного ЭСР, необходимо уменьшать длину канала пМОП-транзистора.

Рассмотрим теперь эффективность применения в КНИ технологии рМОП-транзистора. Поскольку лавинный пробой рМОП-транзистора наступает при довольно высоком напряжении (около 15 В), то характеристики защищенности буфера при отрицательном ЭСР определяются только работой пМОП-транзистора. Более того, при положительном разряде рМОП-транзистор практически не обеспечивает дополнительного отвода тока, так как напряжение низкоомного режима работы пМОП-транзистора мало.

Таблица 1.8 показывает средний уровень защищенности КНИ КМОП-буфера с использованием и без использования рМОП-транзистора под воздействием ЭСР обеих

полярностей. Из неё видно, что рМОП-транзистор не дает большого вклада в защищенность буфера от ЭСР.

Таблица 1.8 Сравнение характеристик защищенности от ЭСР КНИ КМОП-буфера с использованием рМОП-транзистора и без него

| Г. 4 | Напряжение отказа при положительном НВМ | Напряжение отказа при отрицательном НВМ | | |
|--------|---|---|--|--|
| Буфер | разряде, В | разряде, В | | |
| рМОП и | 222 | 187 | | |
| nМОП | 232 | | | |
| Только | 224 | 192 | | |
| nМОП | 224 | | | |

Широко известно, что увеличение расстояния затвор-контакт стока в выходных буферах улучшает защищенность от ЭСР. Но это не приводит к желаемому результату в КНИ КМОП-транзисторах при положительном ЭСР, так как стрессовый ток течет преимущественно по тонкой кремниевой пленке, что приводит к разогреву и повреждениям.

Увеличение расстояния между затвором и контактом стока увеличивает сопротивление этой области, что также приводит к большему рассеиванию мощности в случае отрицательного ЭСР. Таким образом, увеличение расстояния затвор-контакт стока этот параметр должен оставаться небольшим для КНИ КМОП.

Толщина пленки кремния — другой важный параметр, влияющий на защиту от ЭСР. Для одной и той же рассеиваемой мощности температура кремния увеличивается с уменьшением толщины пленки в силу уменьшения теплоемкости кремния меньшего объема. Сильный локальный разогрев возникает также вследствие того, что с уменьшением толщины пленки увеличивается её сопротивление и плотность стрессового тока в ней. В результате характеристики защиты от ЭСР будут ухудшаться с уменьшением толщины пленки кремния в КНИ-структурах.

Увеличить защищенность от ЭСР в традиционных КМОП-схемах можно, увеличивая ширину канала транзистора. Но в КНИ-схемах это не приводит к значительному улучшению характеристик [9]. Таким образом, улучшить защиту КНИ КМОП-буферов, используя методы традиционной КМОП-технологии, нельзя. Чтобы получить аналогичные традиционным характеристики для КНИ КМОП-структур, необходимо принимать иные меры.

В качестве одного из вариантов увеличения защищенности КНИ-структур можно предложить вышеприведенный способ: изготовлять nMOП-транзисторы выходных КНИ-буферов прямо на подложке КНИ, предварительно стравив изолирующий окисел. В аналогичном изготовлении рМОП-транзисторов нет необходимости, так как они не дают большого вклада в отвод стрессового тока; кроме того, изготовление п-кармана в подложке КНИ после стравливания изолирующего окисла представляет большие технологические сложности.

1.6.3 Защитные элементы микросхем фирмы Texas Instruments

В [10] описаны общие принципы построения встроенных схем защиты микросхем фирмы Texas Instruments.

Применяемые схемы защитных устройств учитывают все возможные пути прохождения тока, чтобы предотвратить термическое повреждение кремния, защитной схемы или внутренней логической схемы. Также для предотвращения повреждения оксида затвора учитываются возможные скачки напряжения. Для примера на Рис. 1. представлена обобщенная схема защиты. Ее компоненты описаны в следующих пунктах.

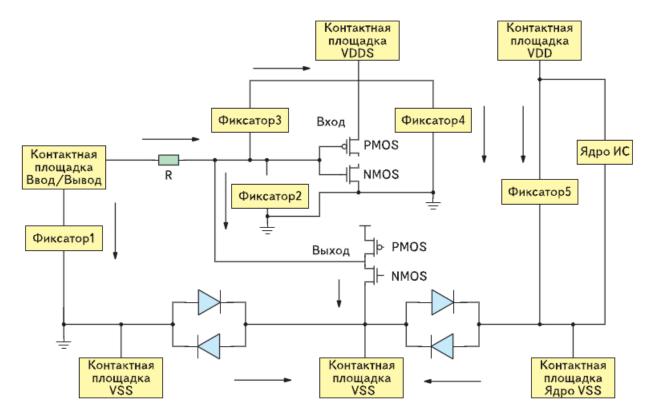


Рис. 1.70. Обобщенная схема защиты микросхем фирмы Texas Instruments

Фиксатор 1 является основным устройством защиты, который защищает ядро микросхемы от электростатического разряда на контактную площадку І/О посредством блокировки напряжения и позволяет высокому току ЭСР разрядиться на землю.

Конструкция фиксатора выбирается исходя из технологии изготовления, назначения и характеристик входной/выходной сигнальной схемы. Этот фиксатор защищает от ЭСР при испытаниях по HBM, MM, и CDM методам. В качестве такого фиксатора может применяться элемент GGNMOST, который был рассмотрен ранее.

Ток через фиксатор 2 ограничен резистором R, и его главная функция заключается в защите оксида затвора входного n-МОП буфера. Фиксатор 2 открывается только после открытия фиксатора 1. Он особенно необходим для защиты от ЭСР при воздействии по методу CDM. Также резистор R выбран так, чтобы ограничить ток в выходной буфер и защитить буферные транзисторы, а также удовлетворить эксплуатационным требованиям выходного буфера.

Фиксатор 3 очень важен для защиты затвора p-МОП входного буфера. Разработка и реализация этого фиксатора имеет решающее значение для защиты при испытаниях по CDM-модели.

Фиксаторы 4 и 5 защищают все внутренние схемы между любым источником питания и землей. Для разных выводов питания фиксатор располагают на каждой площадке, чтобы убедиться, что ядро и внутренние логические схемы защищены от электростатического разряда, возникающего на контактных площадках питания. При разработке этих фиксаторов должны приниматься во внимание требования по предельному напряжению, требования по защите от эффекта защелки, и, в целом, они обеспечивать защиту от перенапряжений. Эти фиксаторы защищают от ЭСР при испытаниях по НВМ, ММ, и СDМ методам.

Так как конструкции ИМС используют разные способы отвода на землю помех, разработка ЭСР-защиты должна гарантировать, что стрессовый ток будет отведен при любых стрессовых комбинациях между входной/выходной площадкой и землей. Диоды, установленные между выводами земли, обеспечивают эффективный отвод стрессового тока.

В [11] описываются встроенные защитные схемы у высокоскоростных КМОП-микросхем серий SN54/74HC. Это микросхемы средней степени интеграции (стандартная логика, триггеры, регистры, счетчики и т.д.). Среди отечественных аналогов можно назвать, например, микросхемы серии К1554. Схемы защиты, разработанные Texas Instruments, обеспечивают устойчивость к ЭСР на входах и выходах микросхем, которая превышает требования по защите от статического электричества в MIL-STD-883B, Method 3015 (2000 B, 1500 Ом, и 100 пФ).

Texas Instruments использует два типа защиты в высокоскоростных КМОП-микросхемах для защиты входов. На Рис. 1.724,a и Рис. 1.724, δ изображены эти две

входные схемы защиты. Обе схемы защиты содержат диоды, которые открываются при входном напряжении большем, чем VCC + 0.5 V.

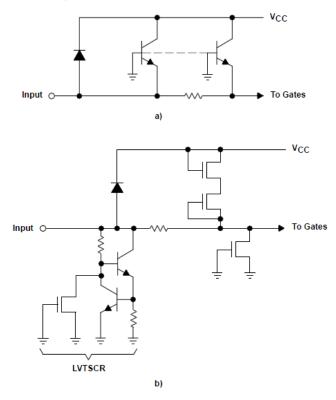


Рис. 1.724. Входные схемы защиты: а) транзисторная; б) тиристорная

На Рис. 1.724 биполярные транзисторы могут быть выполнены как по биполярной технологии, так и по МОП-технологии и представлять собой паразитные биполярные транзисторы.

На Рис. 1.724,6 главная защита обеспечивается SRC с низким напряжением срабатывания (LVTSCR). LVTSCR срабатывает только для положительных импульсных помех, и работает как цепь диод-земля для отрицательных помех. Представленные на рисунке МОП-транзисторы располагаются у затворов входной схемы и обеспечивают дальнейшую блокировку тока разряда.

Далее показаны два типа выходных схем защиты, зависящих от типа устройства. Обе схемы включают в себя паразитные диоды D1 которые ограничивают напряжение в пределах VCC ± 0.5 В в цепи питания.

На Рис..72,*а* дополнительный диод D2 используется для усиления защитного действия паразитного диода. На Рис..72,*б* LVTSCR используется для обеспечения дополнительной блокировки.

Упрощенная схема высокоскоростного входа КМОП показана на Рис. 1.73. Диод и транзисторы обеспечивают блокировку статического разряда и других помех в устройстве. Любой входной сигнал выше, чем Vcc +0,5В или ниже чем -0,5В блокируется

входом. Конденсаторы (С1 и С2) представляют собой паразитные емкости, присутствующие на затворах входа. В спецификациях указано, что суммарная емкость не должна превышать 10 пФ (среднее значение 5 пФ). Входная емкость разделена между Vcc и землей и обеспечивает паразитную обратную связь цепи питания с входом. Если вход устройства управляется высокоимпедансным источником, любые помехи в цепи питания могут попасть на вход.

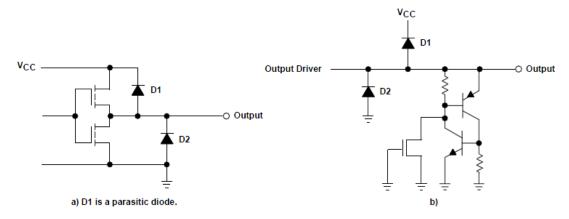


Рис. 1.72. Выходные схемы защиты: а) диодная; б) тиристорная

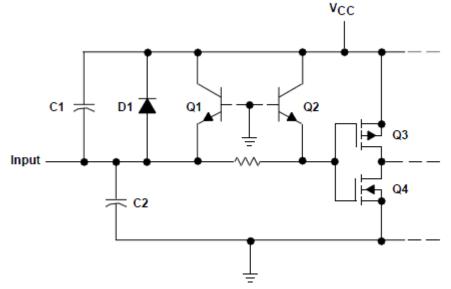


Рис. 1.73. Упрощенная схема защиты входов

1.6.4 Режимы тестирования ИМС на ЭСР

Наиболее часто ЭСР возникает между контактной площадкой входного сигнала и контактной площадкой одной из шин питания. ЭСР может иметь положительную или отрицательную полярность по отношению к потенциалам шин питания Vdd и Vss. Таким образом, имеют место четыре режима возникновения ЭСР на контактной площадке входного/выходного сигнала, приводящие к различным путям протекания стрессового тока. Варианты измерений ЭСР для этих режимов представлены на Рис. 2574.

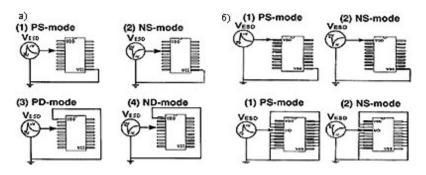


Рис. 2574. Измерение выносливости устройства к ЭСР для четырёх режимов возникновения разряда между контактной площадкой входного/выходного сигнала и контактной площадкой одной из шин питания (а); дополнительные режимы возникновения ЭСР на контактной площадке (б)

Для первого режима (PS-mode) положительный по отношению к потенциалу земли (Vss) электростатический разряд подаётся на одну из контактных площадок входных сигналов, шина питания (Vdd) не подсоединена и стрессовый ток покидает устройство через шину земли. Второй режим (NS-mode) - отрицательный относительно потенциала земли ЭСР стресс на контактной площадке, шина питания не подсоединена, стрессовый ток покидает устройство через шину земли. Для третьего режима (PD-mode) оборвана шина земли, ЭСР стресс положителен относительно потенциала шины питания, через которую стрессовый ток покидает устройство. Для четвёртого режима (ND-mode) оборвана шина земли, ЭСР стресс отрицателен относительно потенциала шины питания, через которую стрессовый ток покидает устройство. Во всех 4-х случаях остальные контактные площадки входов/выходов не подсоединены. Эти стрессовые напряжения могут нанести повреждения как п-МОП, так и р-МОП устройствам входного или выходного буфера. Например, в случае отсутствия защитной схемы от ЭСР между контактной площадкой и шиной питания будет происходить повреждение ИС. В NDрежиме стрессовый ток сначала потечет через схему защиты от контактной площадки к шине земли, а затем через защитную схему между шинами питания (если таковая имеется) или через элементы внутренней схемы к шине питания Vdd. Также любая КМОП ИС обладает паразитными емкостями и сопротивлениями шин, на которых возникает падение напряжения. Это ведёт к повреждению внутренних элементов ИС, несмотря на имеющуюся защиту. ND-режим ЭСР приводит к возникновению стрессового напряжения между шинами питания. Если ток ЭСР не выводится быстро и эффективно из ИС, то могут иметь место повреждения в защитной схеме между Vss и Vdd, а именно разрушения полевого окисла паразитных структур между двумя n+ диффузиями. Таким образом, необходимо обеспечивать защиту от ЭСР между контактной площадкой и обеими шинами полностью обезопасить устройство от повреждения в случае питания, чтобы возникновения ЭСР в любом из четырёх режимов.

Но, даже обеспечив полную защиту от вышеперечисленных четырёх режимов возникновения ЭСР, нельзя быть полностью уверенным в полной защите ИС. Есть вероятность возникновения ЭСР между контактными площадками входного сигналов или контактными площадками шин питания. Ток проходит от одной контактной площадки к другой по некоторому пути через внутренние элементы устройства. Для определения защищённости устройства вводятся дополнительные режимы проведения измерений, представленные на Рис. 2574,6.

Для таких условий измерения ЭСР защиты внутренние элементы достаточно уязвимы даже при наличии полной входной защиты.

В каждом режиме стрессовый ток течёт по своему собственному пути. Также будет происходить повреждение внутренних компонентов при отсутствии какой-либо защиты от ЭСР кроме входной защиты. Для последних четырёх режимов трудно обнаружить повреждение ИС просто отслеживанием тока утечки. Для этого часто требуется полный функциональный контроль для обнаружения неисправной работы. Для обеспечения хорошей защиты от ЭСР необходимо тестировать ИС по всем восьми режимам для трёх моделей: НВМ, ММ, СВМ. В случае недостаточной защищённости можно использовать дополнительные защитные элементы между контактными площадками «чистого» и «грязного» напряжения питания, между контактными площадками шин питания, а также улучшать характеристики входной защиты.

1.6.5 Устойчивость ИМС к воздействию ЭСР

Развитие технологического прогресса в микроэлектронике приводит к тому, что металлизированные дорожки разводки на кристалле становятся всё более узкими, а оксидные слои — всё более тонкими. Например, если при обычно используемой толщине затворного оксида 1000 А его пробой происходит при приложении к затвору постоянного напряжения 80-100 В, то при толщине оксида 400 А напряжение его пробоя лежит в пределах 28–45 В. Это ещё более осложняет проблему отказов ИЭТ из-за воздействия ЭСР, с которой всё чаще сталкиваются разработчики ИЭТ и РЭА [23–28].

Непосредственно перед ЭСР и в течение первых десятков наносекунд разряда на ИЭТ действует наведённое высокое напряжение, являющееся источником тока. В связи с этим на изделие действует и потенциал электрического заряда, и ток разряда. У полупроводниковых приборов и ИС, на которые воздействовали ЭСР, могут иметь место два типа повреждений:

• катастрофические повреждения, обнаруживаемые наиболее легко, так как повреждённые изделия не выполняют своих функций;

• скрытые повреждения, затрагивающие только один из параметров: усиление, утечку и так далее, — или вызывающие некоторые изменения начальных характеристик, которые могут, тем не менее, не выходить за рамки допустимых отклонений. Эти повреждения обнаружить труднее, так как зачастую они проявляются лишь в результате повторяющихся разрядов или в процессе эксплуатации.

Катастрофические отказы ИЭТ при воздействии ЭСР можно разделить на отказы под действием мощности или тока, обычно обнаруживаемые по горячим точкам, или расплавленным участкам на кристалле, и отказы под действием напряжения, пробивающего диэлектрик насквозь или разрушающего поверхность кристалла.

Скрытые дефекты, возникающие от воздействия ЭСР и проявляющиеся в период эксплуатации, можно разбить на три категории:

- нанесённый ущерб настолько мал, что изделие полностью соответствует паспортным характеристикам. Вероятность безотказной работы в течение всего срока службы достаточно велика;
- повреждённый элемент изделия соответствует техническим условиям либо слегка выходит за установленные пределы и вполне способен выполнять свои функции в системе. В этом случае велика вероятность преждевременного отказа;
- изделие работоспособно, но не соответствует всем предъявляемым к нему требованиям. Надёжность изделия существенно понижена.

Общеизвестно, что отрицательное влияние ЭСР в первую очередь сказывается на МОП- и КМОП-приборах. Однако перечень полупроводниковых ИЭТ, особо чувствительных к воздействию ЭСР, не ограничивается указанными типами. Некоторые биполярные приборы также чувствительные к ЭСР. По вине ЭСР в цифровых ИС наблюдалась деградация входных диодов. Особенно опасны ЭСР для ТТЛ ИС с барьером Шоттки, которые пробиваются при энергии ЭСР в 2–3 раза меньшей, чем необходимо для пробоя ТТЛ ИС. Это происходит вследствие меньшего размера барьера Шоттки.

Пороги чувствительности полупроводниковых приборов и ИС приведены в Таблица 1.9.

Относительная чувствительность ИС приведена в Таблица 1.10.

Большой разброс значений порога чувствительности объясняется его зависимостью от размеров испытуемых элементов ИЭТ, технологии изготовления, выбора параметров, характеризующих годность ИЭТ, и от их величин. Например, МОП-приборы с металлическим затвором почти в 9 раз восприимчивее к ЭСР, чем такие же приборы с кремниевым затвором.

При исследовании биполярных ТТЛ ИС с изоляцией *p-n*-переходом (серия 133) и оксидом (серия 106) по результатам сравнительных испытаний на надёжность после воздействия ЭСР, выявлено, что схемы с диэлектрической изоляцией обладают большей стойкостью.

Таблица 1.9

Пороги чувствительности различных микросхем

| Тип ИС | Пороги чувствительности, В |
|------------------------|----------------------------|
| КМОП ИС | 250-3000 |
| Линейные биполярные ИС | 190-2500 |
| ИС ТТЛ | 1000-2500 |
| ИС ЭСЛ | 500-1500 |
| ИС ТТЛШ | 500-1500 |

Таблица 1.10

Относительная чувствительность к ЭСР

| Тип ИС | Относительная чувствительность к ЭСР |
|--|---|
| Стандартные ТТЛ ИС | 1,0 |
| Линейные ИС | 1,3 |
| Цифровые ИС с объединёнными эмиттерами | 1,8 |
| ТТЛ ИС с диодами Шотки | 3,0 |
| моп ис | 3,0 |
| КМОП ИС | 4,6 |

Данные испытаний МОП ИС типа К178ЛР1 на надёжность в течение 1000 часов после воздействия ЭСР различного потенциала показывают, что с увеличением напряжения ЭСР надёжность ИС падает [4]. При этом основной вид отказов ИС серии 178 - пробой тонкого оксида.

Для полупроводниковых ИЭТ опасность представляет не только однократное воздействие ЭСР больших потенциалов, но и многократное воздействие низких потенциалов (Рис.2675) полярности, влияющих на изменение вольтамперных характеристик и отказ биполярных БИС серии 1005.

Воздействие ЭСР разной полярности на ИЭТ не всегда одинаково. Замечено, что зачастую воздействие отрицательной полярности приводит к отказам ИЭТ при меньшем потенциале ЭСР. Различные переходы ИС реагируют на воздействие ЭСР по разному. Для кремниевых МОП ИС типа К561ЛН2 найдено, что наиболее чувствительным путём прохождения ЭСР через ИС является вход - общая точка. Построенные зависимости числа

импульсов ЭСР, приводящих к отказам ИС, от величины ЭСР для импульсов различной полярности показывают, что наиболее опасным для ИС типа K561XH2 является чередование полярности воздействующих ЭСР (на Рис.2776 обозначено как '+/-') [10].

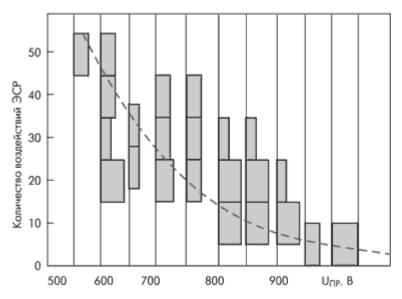


Рис.2675. Результаты эксперимента по установлению величин ЭСР соответствующей

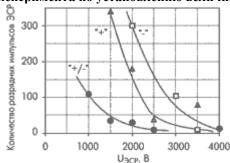


Рис.2776. Зависимость величины напряжения ЭСР, при котором отказывает микросхема, от количества импульсов при различных полярностях для микросхемы К561XH2.

Результаты составных испытаний ИС, состоящих из воздействия ЭСР и термоциклирования (-60; $+125^{\circ}$ С с выдержкой ИС по 15 мин. при каждой температуре и времени переноса не более 30 с) показаны на Рис. 28.

Из Рис. 2877 видно, что термоциклирование снижает стойкость ИС к ЭСР так же, как воздействие ЭСР снижает стойкость ИС к теромоциклированию.

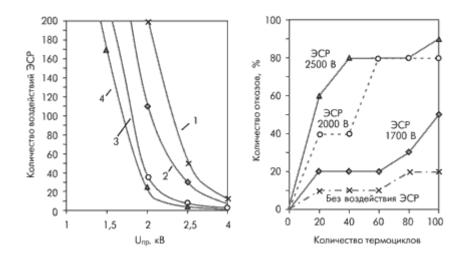


Рис. 2877. Зависимость напряжения ЭСР, при котором отказывает микросхема, от количества импульсов при разном количестве термоциклов (левый рисунок); Зависимость количества отказов микросхем от количества термоциклов при воздействии ЭСР (правый рисунок).

1.7 Моделирование встроенных средств защиты от ЭСР

Целью диссертационной работы является разработка и исследование модели одного из базовых встроенных элементов защиты КМОП микросхем на МОПтранзисторе: n-MOП транзисторе с заземлённым затвором (Grounded Gate NMOS Transistor, GGNMOST). Во многих работах, соответствующих данной тематике описывается принцип работы этого элемента, качественно даются некоторые его характеристики. Точные характеристики и детальные технологические параметры являются коммерческой тайной производителей микросхем, поэтому эти данные нельзя найти в литературе. Поэтому для схемотехнического моделирования защитного элемента необходимо было определить электрические характеристики, которые должны быть у разработанной модели. Разработка топологии элемента в интегральном исполнении и физическое моделирование работы его топологической структуры не проводилось, поэтому технологические параметры не определялись. В первой главе было определено, от какого уровня напряжений должны защищать встроенные элементы защиты и какие выходные параметры у него должны быть. Эти характеристики следующие:

- снижение напряжения импульсного воздействия с 500 В до 30 В;
- скорость срабатывания элемента 1 нс или менее;
- максимально возможная полоса пропускания (в зависимости от микросхем, в которых схема защиты применяется).

Эти требования являются исходными данными для разработки модели встроенного элемента защиты.

Моделирование защитного элемента проводилось в программе Місго-Сар 9. В первом подразделе этой главы описывается разработка модели защитной схемы с усредненными параметрами Spice-моделей. Spice-модели с усредненными параметрами (модели "GENERIC") созданы для активных элементов, таких как диоды, транзисторы и т.д. Они представляют собой модели со средними значениями технологических и электрических параметров элементов.

Далее описывается исследование модели разработанной схемы защиты. Проводится моделирование и снимаются различные статические и динамические характеристики схемы, реакция схемы на короткий импульс напряжения. Потом исследуется зависимость полученных характеристик схемы от различных ее параметров и параметров моделей активных элементов, подбираются оптимальные параметры, приводятся расчетные и оценочные формулы.

1.7.1 Разработка модели схемы защиты от ЭСР с усредненными параметрами Spice-моделей

Определение структуры элемента GGNMOST

Выше был представлен элемент защиты GGNMOST и его принцип работы. Кратко повторим его основные особенности. Этот элемент защиты является элементом с тиристорной характеристикой, то есть после определенного напряжения пробоя он защелкивается и переходит в низкоомную область. На вольт-амперной характеристике элемента это отражается в виде отрицательного дифференциального сопротивления — при увеличении тока напряжение падает. ВАХ элемента и его структура, какой она была показана в [6], представлена на Рис. 29.78.

Одна из основных особенностей работы этого элемента — после включения под действием стрессового напряжения он работает как биполярный транзистор. Латеральный биполярный транзистор вообще является паразитным в КМОП-структурах и вызывает некоторые негативные эффекты, как, например, эффект защелки. Но в данном случае этот паразитный биполярный транзистор используется как полезный в основном режиме работы элемента. Принцип действия латерального биполярного транзистора используется также и в биполярной технологии.

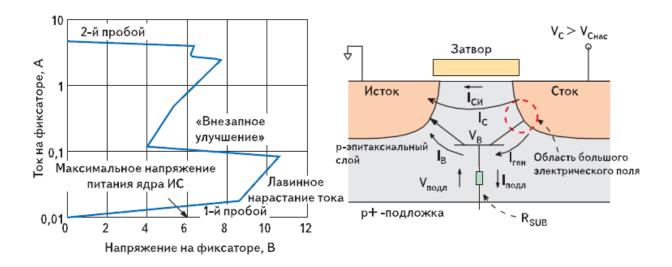


Рис. 29.78. Латеральный биполярный n-p-n-транзистор в составе элемента GGNMOST и его BAX

Также еще одним важным аспектом работы $nMO\Pi$ -транзистора во время ЭСР является время его включения. Оно определяется временем пролета базы t_{be} паразитного биполярного транзистора. При длине канала менее 1 мкм время включения биполярного транзистора составляет менее 250 пс, в то время как время роста ЭСР-стресса по модели НВМ и по модели ММ составляет более 1 нс. В этом случае время включения паразитного биполярного транзистора можно не принимать во внимание. Паразитный биполярный транзистор может не включится при воздействии электростатического разряда по модели CDM, время роста импульса которого может быть меньше 250 пс.

Таким образом, GGNMOST является n-MOП транзистором. Но принцип его действия основывается на открытии паразитного латерального биполярного транзистора после пробоя обратносмещенного диода, образованного стоком и подложкой. Соответственно, для моделирования этого элемента защиты можно использовать модель биполярного транзистора.

Рассмотрим модель Гумеля-Пуна на Рис. 1.79.

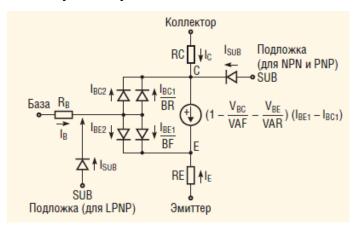


Рис. 1.79. Модель Гумеля-Пуна биполярного транзистора

Вместо диода, образованного стоком и подложкой, для моделирования защитного элемента с применением модели биполярного транзистора, нужно рассмотреть диод, образованный переходом база-коллектор. Чтобы модель Гумеля-Пуна, которая описывает биполярные транзисторы в Spice-программах, была применима для моделирования элемента GGNMOST, нужно, чтобы она описывала пробой этого перехода.

Поведение перехода база-коллектор описывают токи I_{BC1} и I_{BC2} . Рассмотрим их:

$$I_{BC1} = IS(\exp\frac{V_{BC}}{NR\phi_T} - 1);$$
 (1.11)

$$I_{BC2} = ISC(\exp\frac{V_{BC}}{NC\phi_T} - 1).$$
 (1.12)

Здесь IS — ток насыщения при температуре 27 °C, ISC — ток насыщения утечки перехода база-коллектор; V_{BC} — напряжение база-коллектор; NR — коэффициент эмиссии (неидеальности) для инверсного режима; NC — коэффициент эмиссии тока утечки коллекторного перехода; ϕ_T — температурный потенциал.

Рассмотрим теперь уравнение для диода, в частности, для стабилитрона. Ток диода описывается уравнением:

$$I = Ifwd - Irev, (1.13)$$

где Ifwd — ток, описывающий нормальную работу диода без пробоя, Irev — ток, описывающий пробой диода.

$$Irev = IBV(e^{\frac{V+BV}{VT \cdot NBV}} - 1) + IBVL(e^{\frac{V+BV}{VT \cdot NBVL}} - 1), \qquad (1.14)$$

где IBV — начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV; BV — напряжение пробоя; VT — температурный потенциал; NBV — коэффициент неидеальности на участке пробоя; IBVL — начальный ток пробоя низкого уровня; NBVL — коэффициент неидеальности на участке пробоя низкого уровня.

Как видно, формулы (1.11) и (1.12) описывают лишь нормальную работу диодов, представляющих переход база-коллектор. Описания пробоя, аналогичного формулам (1.13), (1.14), у перехода база-коллектор нет. Таким образом, в чистом виде модель Гумеля-Пуна биполярного транзистора для моделирования работы элемента GGNMOST использовать нельзя. Для создания модели защитного элемента к описанию токов через переход база-коллектор биполярного транзистора необходимо добавить описание пробоя. В схемотехническом моделировании это можно сделать, поставив параллельно переходу база-коллектор элемент, у которого есть описание пробоя. Таким элементом является стабилитрон.

Теперь составим схему защитного элемента, которая будет соответствовать его структуре, представленной на Рис. 29.80. Для этого к биполярному транзистору со стабилитроном надо добавить резистор R2 (Рис. 1.80,a), на котором при пробое стабилитрона будет падать напряжение, достаточное для открытия биполярного транзистора. Резистор R1 необходим для ограничения тока через защитный элемент, а резистор R3 с небольшим сопротивлением является, как и резистор R2, является объемным резистором, распределенным по топологической структуре защитного элемента. Выходное напряжение снимается с коллектора биполярного транзистора.

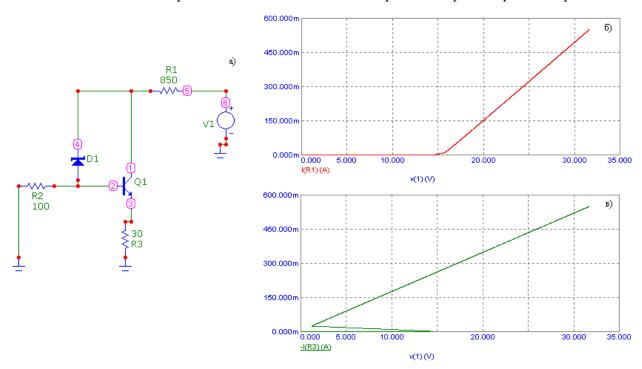


Рис. 1.80. Модель защитного элемента: a) схема, соответствующая структуре элемента; б) ее ВАХ; в) ВАХ защитного элемента с тиристорной характеристикой.

При моделировании составленной схемы (Рис. 1.80,6) видно, что ВАХ такой схемы соответствует ВАХ ограничителя напряжения. То есть работа этой схемы аналогична работе стабилитрона. А элемент GGNMOST является элементом с пробойной (тиристорной) характеристикой, какая представлена на Рис. 1.80,6. Таким образом, структура элемента, приведенная в [6], не соответствует его принципу действия.

Теперь изменим схему так, чтобы работа схемы соответствовала описанию в [6]. Если перенести резистор R1 в коллекторную цепь, а выходное напряжение снимать с коллектора, то получим положительную обратную связь. Тогда транзистор будет защелкиваться, а весь элемент в целом будет переходить в низкоомное состояние. Таким образом, если поставить резистор в коллекторную цепь, мы получим элемент с пробойной характеристикой. На Рис. 1.81 показано, как может выглядеть структура этого элемента.

Его отличие от структуры, представленной на Рис. 29.78 состоит в том, что у последней ширина стоковой области шире. Поэтому сопротивление области стока будет больше, чем в ранее представленной структуре. Если на области стока сделать два металлизированных вывода, изолированных друг от друга, то эта структура будет соответствовать измененной схеме. Повышенное сопротивление стоковой области между двумя выводами обеспечит положительную обратную связь и позволит получить тиристорную характеристику у этого элемента. Входным выводом, который будет соединяться со входом или выходом микросхемы, должен быть вывод, дальней от затвора. Коллектором латерального паразитного биполярного транзистора в данном случае является ближайшая к затвору область стока. Поэтому ближний к затвору вывод должен быть выходным контактом защитной схемы, который потом идет на КМОП входы внутренней логической схемы микросхемы.

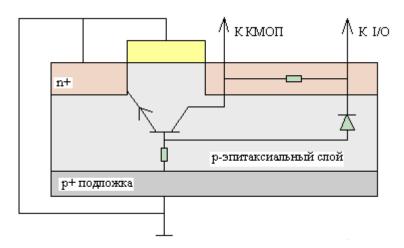


Рис. 1.81. Структура элемента GGNMOST.

Статические характеристики модели с усредненными параметрами.

После того, как была определена структура элемента GGNMOST, обеспечивающая его тиристорную характеристику, можно разработать принципиальную схему элемента, эквивалентную топологической структуре. На Рис. 1. представлена такая схема элемента защиты. Узел 5 соединен с входным/выходным выводом микросхемы и является входным узлом для схемы защиты, через который поступает на него входное возмущающее воздействие. Узел 1 соединен с затвором КМОП внутренней логической схемы. Кроме показанных на Рис. 1.81 резисторов, в схеме на Рис. 1.82 добавлены резисторы в эмиттерную цепь и цепь диода. Их использование обосновано, т.к. области топологической структуры представляют собой объемные резисторы с различными номиналами, на которых падает напряжение. В схемотехническом моделировании использование всех резисторов позволяет более эффективно изменять характеристики схемы, изменяя номиналы резисторов.

ВАХ этого защитного элемента и зависимость выходного напряжения от входного показаны на Рис. 1.83. Как видно, при перенапряжении на контактной площадке микросхемы в 500 В, на комплементарные входы внутренней логической схемы попадает лишь 30 В. При применении внешней защиты такая встроенная схема позволит надежно защитить КМОП микросхемы от повреждения статическим электричеством.

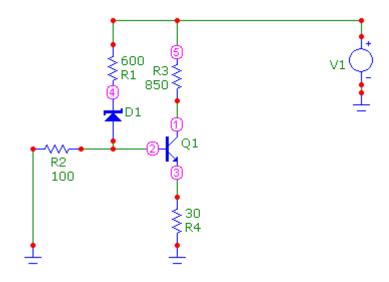


Рис. 1.82. Модель элемента защиты GGNMOST

Статические характеристики элемента защиты можно характеризовать следующими параметрами:

- $U_{om\kappa p}$ напряжение открытия элемента, при достижении которого элемент входит в область с отрицательным дифференциальным сопротивлением, а после в низкоомный режим;
- $I_{umn.makc}$ максимальный импульсный ток (коллекторный и базовый), который может пропустить через себя элемент;
- $U_{\text{вых.макс}}$ максимальное выходное напряжение, которое попадает на затвор КМОП; оно должно быть не больше пикового пробивного напряжения, при котором повреждается затвор КМОП.

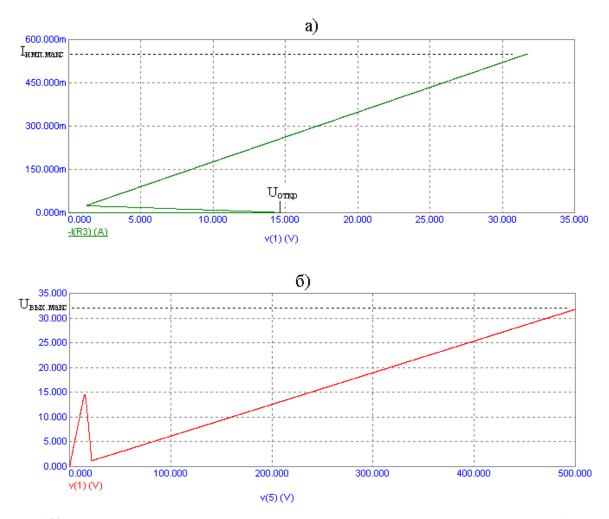


Рис. 1.83. ВАХ защитного элемента (а) и зависимость выходного напряжения от входного (б).

Исходя из этих параметров, выбираются номиналы резисторов R1-R4. Резистор R3 ограничивает коллекторный ток I_{κ} и максимальное выходное напряжение $U_{{\scriptscriptstyle 6bix.Makc}}$. Резистор R1 ограничивает базовый ток I_{δ} , но при его увеличении возрастает напряжение открытия элемента. Резистор R2 компенсирует это влияние. Резистор R4 нужен для дополнительного ограничения базового тока I_{δ} , его сопротивление порядка 30 Ом.

Номинал резистора *R3* можно оценить из следующих формул:

$$I_{\text{K.MAKC}} \approx \frac{U_{\text{BX.MAKC}}}{R3}$$
; (1.15)

$$U_{\text{BbIX.Markc}} \approx U_{\text{BX.Markc}} \frac{R_{Q\text{OTKP}} + R4}{R3},$$
 (1.16)

где $I_{\kappa,ma\kappa c}$ — максимальный коллекторный ток, должен быть не больше максимального импульсного тока $I_{umn,ma\kappa c}$; $U_{ex,ma\kappa c}$ — максимальное входное напряжение, в схеме на рис. 3 номиналы рассчитывались на напряжение 500В; $R_{Q\ om\kappa p}$ — сопротивление коллектор-эмиттер открытого транзистора, порядка 20 Ом.

Величины резисторов R1 и R2 можно оценить из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} U_{\text{откр}} \approx U_{\text{бэ.нас}} \frac{R2 + R1}{R2} + V_{\text{BV}} \\ I_{\text{б.макс}} \approx \frac{U_{\text{вх.макс}} - U_{\text{откр}}}{R1} \frac{R2}{R2 + R4} \end{cases}$$

$$(1.17)$$

где $U_{69 \text{ нас}}$ — напряжение насыщения перехода база-эмиттер, порядка 1 В; V_{BV} — напряжение открытия стабилитрона D1; $I_{6.макc}$ — максимальный базовый ток, должен быть не больше максимального импульсного тока $I_{umn.мakc}$.

В схеме на Рис. 1.82 номиналы резисторов R1–R4 выбраны для следующих параметров: $U_{om\kappa p}=15~\mathrm{B};~I_{umn.ma\kappa c}=1\mathrm{A};~U_{вых.ma\kappa c}=30~\mathrm{B}.$

1.7.2 Разработка модели дискретной схемы защиты

Для того, чтобы разработанную модель элемента GGNMOST можно было применять для моделирования воздействия ЭСР на микросхемы, необходима проверка этой модели, верификация. В данном случае верификация модели предполагает проверку полученных характеристик на реальном опытном образце. То есть для доказательства адекватности разработанной модели необходимо испытать на воздействие электростатического разряда микросхемы, в которых применяется элемент защиты GGNMOST. Также необходимо снять у элемента статические и динамические характеристики. Тут мы сталкиваемся с двумя большими трудностями:

- Во-первых, в литературе нет данных о том, в каких микросхемах в качестве встроенного защитного элемента применяется элемент GGNMOST;
- Во-вторых, даже если бы было известно, где применяется этот элемент защиты, снять статические и динамические характеристики элемента было бы невозможно, т.к. в интегральной структуре нет доступа к выходу защитного элемента.

Поэтому было принято решение верификацию защитного элемента проводить на схеме защите, собранной на дискретных элементах и аналогичной по принципу действия элементу GGNMOST. Разработка дискретной схемы защиты, выбор активных компонентов приведен ниже. В этом подразделе рассматривается модель дискретной схемы защиты, исследуется зависимость выходных характеристик от номиналов пассивных компонентов схемы (резисторов). Далее подбираются номиналы, при которых работа схемы будет оптимальной. Потом проводится моделирование схемы, снимаются статические и динамические характеристики для сравнения ниже с полученными экспериментальными характеристиками.

1.8 Экспериментальные исследования. Испытания разработанной схемы защиты, рекомендации по ее внедрению

Выше была разработана модель встроенного элемента защиты от ЭСР интегральных микросхем GGNMOST. В этой главе описывается процесс верификации разработанной модели – проверка работы модели на разработанном опытном образце дискретной схемы защиты.

Процесс разработки дискретной схемы защиты, выбор элементной базы описывается в первом подразделе этой главы. Чтобы провести испытания разработанной схемы защиты, необходимо разработать соответствующий стенд, на котором будут сниматься характеристики схемы защиты, проводиться испытания схемы защиты на ЭСР. Процесс разработки этого стенда описывается во втором подразделе этой главы.

В третьем подразделе этой главы описывается непосредственно сам процесс испытаний схемы защиты. В последнем подразделе делаются выводы об адекватности разработанной модели схемы защиты для моделирования воздействия ЭСР на ИМС. Также даются рекомендации по внедрению модели и дискретной схемы защиты.

1.8.1 Разработка дискретной схемы защиты

Выберем активные элементы для схемы. Нам необходимо выбрать высокочастотный биполярный прп-транзистор и стабилитрон. Требования к транзистору – как можно большая частота среза и, по возможности, максимальная допустимая мошность.

К стабилитрону особых требований не предъявляется, т.к. исследование модели схемы защиты с усредненными параметрами показало, что изменение параметров spiceмодели стабилитрона не влияет на выходные характеристики схемы. Таким образом, можно взять любой стабилитрон с напряжением ограничения 15 В. Т.к. схема защищает от импульсного воздействия с малым фронтом, она должна быть приспособлена для работы на высоких частотах. Поэтому для уменьшения индуктивности выводов возьмем стабилитрон с SMD-выводами BZV55C15.

Теперь выберем транзистор. Компания NXP Semiconductors одна из ведущих компаний в области производства высокочастотных полупроводниковых элементов. Компания NXP выпускает ряд высокочастотных компонентов, такие как: РЧ-синхронизаторы, трансиверы (GSM/GPRS/EDGE), продукты промежуточной частоты (смесители, преобразователи, переключатели, усилители), микшеры/осцилляторы, высокочастотные диоды, высокочастотные операционные усилители, высокочастотные транзисторы высокой мощности, полевые транзисторы для слабых сигналов, передатчики,

высокочастотные широкополосные транзисторы, микросхемы с низким уровнем шума, кремниевые ТВ-приемники, коммутаторы, и другие приемники, например для автомобильных стерео радиоприемников. Транзисторы выпускаются по различным технологиям: биполярной, VDMOS и LDMOS. Биполярная технология широко применялась в 70-х годах 20 века и на данный момент хорошо изучена и описана во многих литературных статьях. По технологии LDMOS, которая является наиболее перспективной, производится множество мощных транзисторов с полосой пропускания до 3,8 ГГц. Но эта технология МОП, а нам нужен биполярный транзистор.

Поэтому искать приходится среди радиочастотных биполярных транзисторов средней мощности. Но требование по мощности не так критично, т.к. при импульсном воздействии элементы позволяют пропускать через себя большую мощность.

В *Таблица* 1.6.11 представлены транзисторы фирмы NXP. Их характеристики не сильно различаются друг от друга, поэтому был выбран транзистор, который легче всего найти в продаже – BFG67.

РЧ-транзисторы фирмы NXP

Таблица 1.61

| Тип транзистора | Корпус | Граничная частота fгр, ГГц | Vкэ max, B | Iк мах, мА | Р тах, мВт | GP (dB) |
|-----------------|----------------|----------------------------------|------------|---------------|------------|---------|
| BFG10 | <u>SOT143B</u> | - | 8 | 250 | 400 | 7 |
| BFG10W | SOT343N | - | 10 | 250 | 400 | |
| BFG21W | SOT343R | - | 4.5 | 500 | 600 | 10 |
| BFG94 | <u>SOT223</u> | 6 | 12 | 60 | 700 | 13.5 |
| BFG67 | SOT143B | 8 | 10 | 50 | 380 | 17 |
| BFQ67 | SOT23 | 8 | 10 | 50 | 300 | 14 |
| BFQ67W | <u>SOT323</u> | 8 | 10 | 50 | 300 | 13 |
| <u>PBR941</u> | SOT23 | 8 | 10 | 50 | 360 | 15 |
| PBR951 | SOT23 | 8 | 10 | 100 | 365 | 14 |
| PRF947 | <u>SOT323</u> | 8.5 | 10 | 50 | 250 | 16 |
| PRF957 | <u>SOT323</u> | 8.5 | 10 | 100 | 270 | 9.2 |
| BFG520 | <u>SOT143B</u> | 9 | 15 | 70 | 300 | 19 |
| BFG520W | SOT343N | 9 | 15 | 70 | 500 | 17 |
| BFG540 | <u>SOT143B</u> | 9 | 15 | 120 | 400 | 11 |
| BFG540W | SOT343R | 9 | 15 | 120 | 500 | 10 |
| BFG541 | <u>SOT223</u> | 9 | 15 | 120 | 650 | 9 |
| BFM520 | SOT363 | 9 | 8 | 70 | 1000 | 15 |

Итак, выбраны активные компоненты, сопротивления резисторов в схеме были выбраны, исходя из компромиссных решений для обеспечения оптимальных

характеристик в предыдущей главе. На Рис..30.84. Схема защиты на дискретных элементах изображена схема защиты на дискретных элементах.

Теперь опишем процесс проектирования защитного устройства. Возможны 2 варианта применения защитной схемы:

- в виде отдельного устройства, которое представляет собой печатную плату с соединителями для крепления на защищаемое устройство;
- в виде участка схемы. При разработке устройства в области рядом с выводами микросхем, которые нужно защитить от воздействия ЭСР вставляются печатные дорожки разработанной схемы защиты.

Для любого варианта к топологии защитной схемы предъявляются следующие требования:

- область размещения элементов защитной схемы должна быть минимальной. Эти требования диктуются и габаритными показателями разрабатываемых цифровых устройств, и необходимостью работы защитной схемы на высоких частотах;
- сигнальные проводники должны иметь минимальную длину;
- общая точка (GND) должна иметь, по возможности, отдельный слой для обеспечения минимального воздействия друг на друга разных сигнальных проводников.

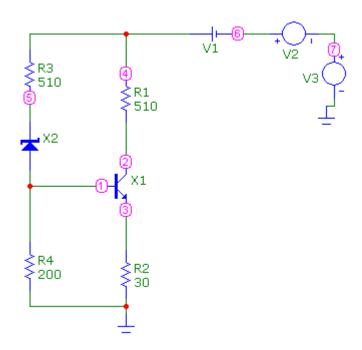


Рис..30.84. Схема защиты на дискретных элементах

Последние два требования также продиктованы необходимостью работы схемы на высоких частотах.

Так как цель разработки опытного образца дискретной схемы защиты – верификация полученной модели, то целесообразно разрабатывать схему защиты в виде отдельного устройства. В таком исполнении ее легко можно будет испытывать и снимать ее выходные характеристики. Учитывая все вышеперечисленные требования, была разработана плата для защитной схемы (Рис. 1.85). Ее размер – 11х17 мм, плата однослойная с двусторонней печатью. Нижним слоем размещен слой «земли». Для крепления платы на защищаемое устройство на плату симметрично установлены два прямых гнездовых двухконтактных соединителя PBS-2. Соответственно, на стенде для испытаний схемы защиты будут стоять два штыревых соединителя PLS-2 и таким образом плата защитной схемы будет подключаться к стенду. Также на рис. 1.85. Дан внешний вид защитного устройства

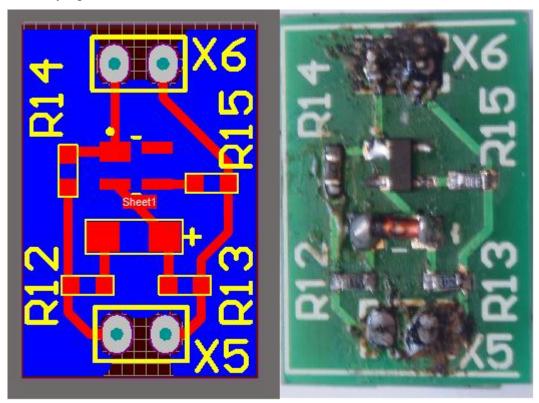


Рис. 1.85. Плата для дискретной схемы защиты

1.8.2 Разработка испытательного стенда

Испытательный стенд нужен для снятия характеристик дискретной схемы защиты и испытания ее на электростатический разряд. Для того, чтобы определить концепцию стенда, определим для начала, какие измерения на испытательном стенде нам необходимо будет проводить. Для схемы защиты мы выделяли 3 вида характеристик: статические, динамические и характеристики переходных процессов. Рассмотрим эти виды характеристик теперь более подробно:

- статические характеристики ВАХ и зависимость выходного напряжения от входного;
- динамические характеристики АЧХ схемы защиты.
- характеристики переходных процессов искажение схемой защиты цифрового сигнала и переходной процесс при воздействии ЭСР.

Для снятия зависимости выходного напряжения от входного необходимо подавать на вход защитной схемы постоянное напряжение и измерять напряжение с выхода схемы. Подавать напряжение можно от источника постоянного напряжения через клеммник. Измерять напряжение будет схема стенда, которая будет рассмотрена далее. ВАХ схемы защиты будет строиться из зависимости выходного напряжения от входного (ток измеряться не будет) по формуле:

$$I_K(U_{gbix}) = \frac{U_{gx} - U_{gbix}}{R3}$$
 (1.18)

Для построения АЧХ схемы нужно на ее вход подавать синусоидальный сигнал разной частоты определенной амплитуды и с выхода снимать аналогичный сигнал с уменьшенной амплитудой. Для проведения этого эксперимента нужны генератор сигналов высокочастотный и осциллограф. Для подключения приборов на стенде должны быть два высокочастотных соединителя типа ВNC, один из которых подключен к входу защитной схемы, а другой к ее выходу. Точно этими же приборами и используя эти же разъемы, можно определить искажение защитной схемой цифрового сигнала.

При испытании на ЭСР схемы защиты необходимо на вход схемы подавать электростатический разряд, а на выходе анализировать эффективность защиты от электростатического разряда. Для подачи электростатического разряда нужна контактная площадка на стенде, причем весь остальной стенд должен быть защищен экраном от воздействия ЭСР. Эффективность стенда анализировать будет внутренняя схема стенда.

Итак, разрабатываемый испытательный стенд должен:

- соединять вход схемы с клеммником для подачи постоянного напряжения, с высокочастотным разъемом ВNC для подачи сигналов с генератора и с контактной площадкой, на которую будет воздействовать ЭСР.
- соединять выход схемы с высокочастотным разъемом BNC для подключения к осциллографу.
- обеспечить измерение постоянного напряжения на выходе схемы и анализ эффективности схемы защиты от воздействия электростатического разряда.

Теперь рассмотрим концепцию функциональной части стенда, которая должна обеспечить измерение постоянного напряжения на выходе схемы и анализ эффективности

схемы защиты от воздействия электростатического разряда. Анализ эффективности защиты от воздействия ЭСР будет обеспечиваться следующим образом:

- с выхода схемы защиты через схему деления импульсный сигнал будет подаваться на элемент сравнения с опорным напряжением;
- далее, если напряжение превышает установленное опорное (30 В) с выхода элемента сравнения на вход одновибратора будет подаваться короткий одиночный импульс, по времени сравнимый с ЭСР;
- короткий одиночный импульс запускает одновибратор, и на его выходе будет импульс заданной длительности;
- с выхода одновибратора сигнал будет подаваться на вход S одного триггера, а с выхода делителя после схемы защиты на вход S другого триггера. Также на входы R будет подключена кнопка для сброса триггеров.
- к выходам триггеров будут подключены светодиоды для индикации эффективности схемы защиты: зеленый светодиод будет гореть при нормальной работе схемы защиты без воздействия ЭСР, желтый будет гореть, если после воздействия ЭСР напряжение на выходе защитной схемы не превысило установленного в качестве опорного, а красный будет загораться, если выходное напряжение превысило установленный порог.

Элемент сравнения сравнивает поступающие на него напряжения в пределах напряжения питания – 5 В. На выходе защитной схемы максимальный разрешенный порог – 30 В. Поэтому для работы элемента сравнения ставится делитель напряжения на 10 (чтобы обеспечить запас измеряемых напряжений до 50 В) Одновибратор нужен для того, чтобы гарантированно записать в триггер информацию о превышении допустимого уровня сигнала с выхода защитной схемы. Импульса с выхода элемента сравнения, который по времени сравним с длительностью фронта электростатического разряда, может не хватить для записи бита в триггер (быстродействие триггеров меньше, чем у элемента сравнения).

Рассмотренная концепция функциональной схемы стенда будет обеспечивать и измерение выходного напряжения схемы защиты на постоянном токе. Для этого, вместо электростатического разряда, на вход схемы защиты через клеммник надо подавать постоянное напряжение. Далее надо зафиксировать, при каком опорном напряжении загорится красный светодиод, это и будет напряжение на выходе схемы защиты. Структурно-функциональная схема стенда представлена на Рис. 1.86.

Теперь рассмотрим быстродействие некоторых структурно-функциональных узлов испытательного стенда. Наиболее быстродействующим должен быть элемент сравнения — он должен реагировать на импульс с фронтом 1 нс. При критической длине входного импульса на выходе узла будет минимальная фиксированная длина выходного импульса, обусловленная задержками элемента. Поэтому быстродействие входа одновибратора может быть больше — около 2—3 нс. Одновибратор на выходе выдает длительный импульс, поэтому быстродействие триггера не принципиально.

Теперь выберем для каждого функционального узла конкретное схемное исполнение и выберем элементную базу.

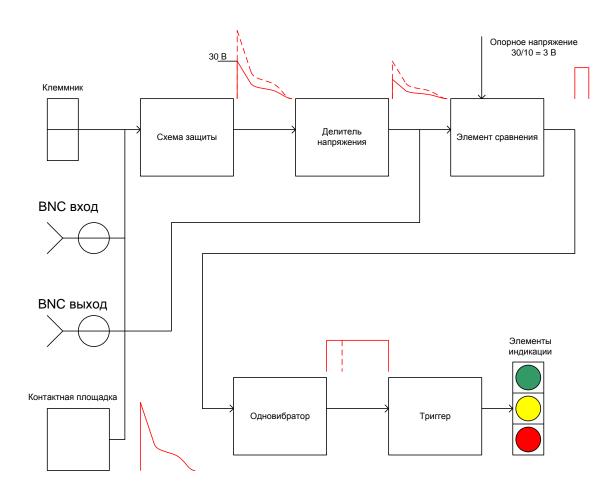


Рис. 1.86. Структурно-функциональная схема испытательного стенда

После схемы защиты выходное напряжение делится двумя резисторами. С выхода делителя напряжение подается элемент сравнения. Он реализован на компараторе. На один вход компаратора подается напряжение с делителя, а на другой вход опорное напряжение, которое регулируется движковым переменным резистором. Так как к компаратору предъявляются высокие требования по быстродействию, то был выбран компаратор MAX9691, быстродействие которого 1,2 нс.

Теперь выберем схемное исполнение одновибратора. Рассмотрим два схемных исполнения — на операционном усилителе и на логических элементах. На Рис. 1.80.87. изображена схема одновибратора на ОУ (а) и временная диаграмма его работы (б).

Если выходное напряжение ОУ отрицательное максимальное, то диод VD1 открыт, и напряжение на времязадающем конденсаторе u_c небольшое отрицательное, равное примерно 0.5 В. При правильном выборе параметров схемы напряжение на неинвертирующем входе ОУ

$$u_{p} = -U_{M} \frac{R_{1} \parallel R_{3}}{R_{1} \parallel R_{3} + R_{2}} < u_{C}$$
(7.2)

поэтому при отсутствии запускающего импульса $U_{3\text{ап}}$ схема находится в устойчивом состоянии. По приходе положительного запускающего импульса достаточной амплитуды операционный усилитель за счет положительной обратной связи переключается в такое состояние, при котором его выходное напряжение равно $+U_{\text{м}}$. Диод VD2 закрывается и на p-входе OV устанавливается напряжение $U_{\text{п}}$. К времязадающей цепи RC теперь приложено напряжение $+U_{\text{м}}$, под действием которого закрывается диод VD2 и начинается заряд конденсатора C. Когда, спустя время t_{1} , напряжение $u_{\text{с}}$ достигнет порога $U_{\text{п}}$, операционный усилитель переключится и вернется в первоначальное состояние. Конденсатор C начнет разряжаться и, спустя промежуток времени t_{p} , называемый временем релаксации, напряжение u_{c} станет отрицательным, диод VD1 откроется и цикл закончится. Длительность импульса одновибратора:

$$t_1 = RC\ln\{[1 + (R_1/R_2)][1 + (U_{\perp}/U_{\rm M})]\}. \tag{1.19}$$

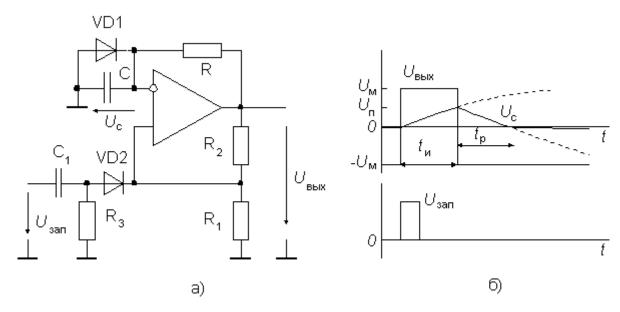


Рис. 1.80. Схема одновибратора на ОУ (а) и временная диаграмма его работы (б)

Из последнего выражения видно, что длительность импульса одновибратора зависит от выходного напряжения насыщения ОУ, которое, в свою очередь определяется напряжением питания. Другим недостатком рассмотренной схемы является значительное время релаксации, в течение которого на одновибратор нельзя подавать запускающий импульс (иначе будет сокращена длительность выходного импульса). Эти недостатки отсутствуют у одновибратора, выполненного на специализированных ИМС, называемых аналоговыми таймерами.

На Рис. 1.88 показана распространенная схема одновибратора на элементах ИЛИ-НЕ структуры КМОП. В исходном состоянии на обоих входах элемента DD1.1 действует напряжение низкого уровня, конденсатор C1 разряжен. На входах элемента DD1.2 — высокий уровень. С приходом запускающего импульса (момент t_1 на Рис. 1., δ) напряжение на выходе элемента DD1.1 сменится на низкое. Одновременно упадет и напряжение на входах элемента DD1.2, так как конденсатор C1 разряжен. На выходе одновибратора возникнет напряжение высокого уровня. Это временно устойчивое состояние, не зависящее от входного сигнала, поскольку на нижнем (по схеме) входе элемента DD1.1 — высокий уровень. Начиная с момента t_1 конденсатор C1 будет заряжаться по цепи: $U_{\rm II}$ — резистор R1 — конденсатор C1 — выход элемента DD1.1.

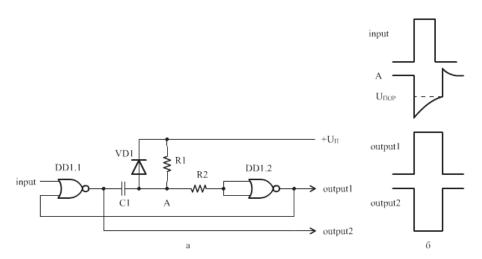


Рис. 1.88. Схема одновибратора на элементах ИЛИ-НЕ (а) и временная диаграмма его работы (б)

Когда на обкладках конденсатора C1 напряжение станет равным пороговому уровню для элемента DD1.2, произойдет новое переключение (предполагается, что пусковой импульс к этому времени окончился), устройство вернется в исходное состояние (момент t_3), а конденсатор C1 быстро разрядится по цепи: диод VD1 — провод питания — выходной транзистор элемента DD1.1. Одновибратор готов к новому запуску. Если пауза между импульсами превышает их длительность, то можно обойтись без диода VD1.

Длительность выходного импульса можно определить по формуле:

$$\tau_{M} = R\mathbf{1}C\mathbf{1}\ln\frac{U_{\Pi}}{U_{\Pi} - U_{\Pi OP}},$$
(1.20)

где $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение элемента DD1.2.

Так как пороговое напряжение наличных экземпляров микросхем обычно неизвестно (техническими условиями допускается разброс от $0.3\,U_{\rm II}$ до $0.7\,U_{\rm II}$), для ориентировочных расчетов принимают среднее значение $0.5\,U_{\rm II}$. Последняя формула при этом упрощается:

$$\tau_{M} = R1C1 \ln \frac{U_{\Pi}}{U_{\Pi} - U_{\Pi OP}} = R1C1 \ln 2 \approx 0,7R1C1$$
(1.21)

Как следует из принципа действия описанного одновибратора, пусковой импульс по длительности должен быть короче выходного. Если это условие невозможно выполнить, на входе включают дифференцирующую цепь.

Вариант рассмотренной схемы на логических элементах И-НЕ представлен на Рис. 1.87.

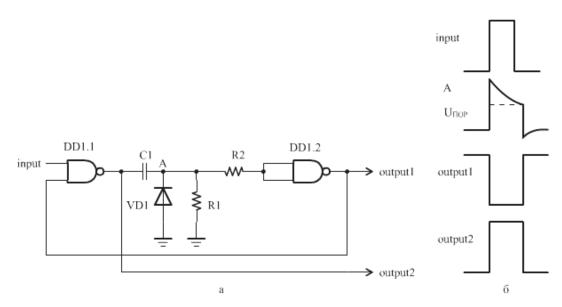


Рис. 1.87. Схема одновибратора на элементах И-НЕ (а) и временная диаграмма его работы (б)

Так как нам не важна высокая точность длительности выходного импульса, возьмем схему мультивибратора на логических элементах ИЛИ-НЕ. Она наиболее проста в исполнении. Так же частота запускающих импульсов (частота воздействия ЭСР) у нас невелика, поэтому диод для быстрой разрядки конденсатора использовать не будем. Номиналы времязадающей цепочки выберем следующие: C1 = 1 нФ, R1 = 5 кОм.

После того, как схемная реализация и элементная база выбрана, можно составлять принципиальную схему стенда. Она показана на Рис. 1.88. Питание стенда производится от элемента 9 В, а микросхемы и схема защиты запитываются 5 В через микросхемы

стабилизации напряжения KP142EH5A. Одна микросхема стабилизации питает микросхемы стенда, а другая схему защиты, т.к. нужна развязка в цепи 5В между схемой защиты и стендом. Это необходимо, чтобы воздействие ЭСР не вывело из строя микросхемы стенда.

По принципиальной схеме была разработана плата. Топология платы и ее внешний вид представлены на Рис. 1.9.

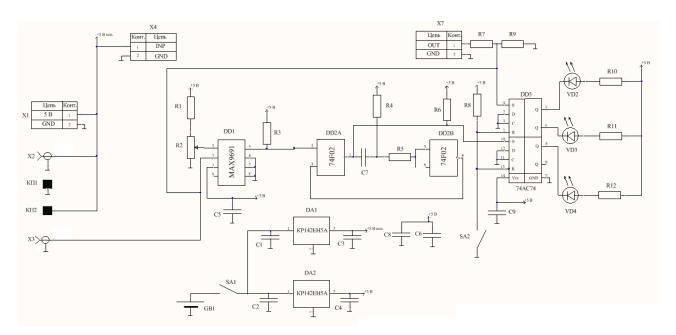


Рис. 1.88. Принципиальная схема испытательного стенда

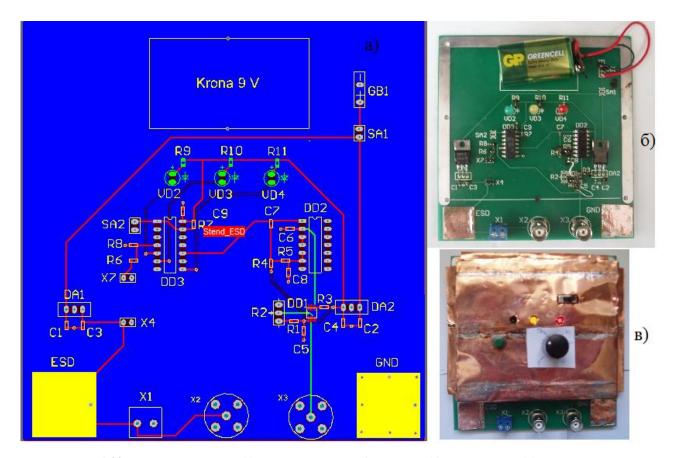


Рис. 1.89. Топология платы (а), ее внешний вид без экрана (б) и с экраном (в)

1.8.3 Испытания дискретной схемы защиты

Для исследования характеристик защитной схемы были проведены следующие эксперименты:

- снятие зависимости выходного напряжения схемы защиты от входного;
- снятие амплитудно-частотной характеристики схемы.

При снятии зависимости выходного напряжения от входного на вход схемы защиты подавалось постоянное напряжение от источника питания, а на выходе измерялось выходное напряжение. Вид зависимости у реальной схемы и у модели представлены на Рис. 1.310. Напряжение открытия у реальной схемы и у модели отличается всего на 1,5 В, что не принципиально для защиты от ЭСР. Такое различие может быть обусловлено нагреванием элементов на постоянном токе и, отсюда, уменьшением напряжения открытия. Схемотехническое моделирование не учитывает процесс нагревания элементов, в программах Spice-моделирования учитывается лишь стационарной температурный режим, который устанавливается оператором. Поэтому при моделировании получились небольшие различия.

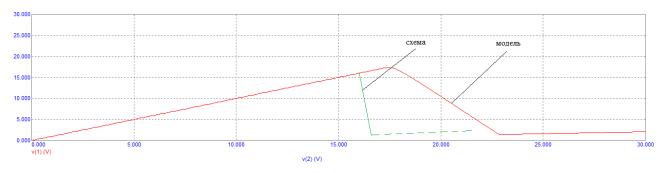


Рис. 1.310. Зависимость выходного напряжения от входного у реальной схемы защиты и у ее модели

При снятии АЧХ на входной высокочастотный разъем испытательного стенда подавалось переменное синусоидальное напряжение заданной амплитуды от генератора сигналов. Выходной высокочастотный разъем был подключен к осциллографу, которым проводились измерения входной и выходной амплитуд. Видно, что частота среза реальной схемы существенно ниже аналогичного параметра модели. Различаются они в два раза – модель схемы защиты имеет частоту среза 500 МГц, а реальная схема защиты – всего 250 МГц. Это может быть обусловлено следующими факторами:

- Влияние на AЧX цепей испытательного стенда, индуктивностей печатных проводников, и т.д.,
- Несоответствие реальной емкости обратносмещенного диода емкости модели.

1.8.4 Выводы по экспериментам. Рекомендации по внедрению модели и дискретной схемы защиты

Снятие основных статических и динамических характеристик дискретной схемы защиты показало удовлетворительную корреляцию эксперимента и моделирования. Статические характеристики сходятся в эксперименте и в модели с большой точностью (разница в 1,5 В). Большая различие (в 2 раза) у АЧХ в эксперименте и при моделировании. Но при моделировании не учитывалось влияние испытательного стенда на амплитудно-частотную характеристику, поэтому модель можно считать применимой для моделирования встроенных схем защиты интегральных КМОП микросхем.

Разработанная модель элемента защиты GGNMOST может применяться вместе с моделями цифровых микросхем, в которых она применяется. У конкретных микросхем с элементом защиты GGNMOST параметры этого элемента защиты могут отличаться. Поэтому сначала надо составить модель элемента защиты, соответствующую элементу защиты конкретной микросхемы. Для этого нужно получить ВАХ и АЧХ модели, аналогичные реальному элементу. Далее, после того, как модель элемента защиты

составлена, в зависимости о топологии интегральной микросхемы, выходы схемы защиты соединяются с конкретными входами модели цифровой микросхемы. Полученная модель будет довольно точно отражать работу цифровой микросхемы со встроенной защитой.

Также в ходе данной диссертационной работы была разработана схема защиты, аналогичная встроенной схеме защиты, собранная на дискретных элементах виде отдельного защитного устройства. Такую схему также можно применять для дополнительной защиты входов ИМС от импульсных помех. Дадим рекомендации по применению схемы защиты. Схема защиты должна защищать каждый вход цифровой микросхемы. Причем схема защиты должна располагаться как можно ближе к выводам микросхемы, которые схема защиты защищает. Лучше всего схему защиты использовать не виде отдельного устройства, а размещать во время проектирования платы участки печатного монтажа, где будет располагаться эта схема. Также она должна располагаться между микросхемой и интерфейсными выводами устройства, через которые может идти помеха. Так как схема защиты состоит из 6 компонентов, есть ограничения по размеру микросхем, которые она может защищать. Но, в любом случае, схема защиты должна иметь максимально плотную компоновку, иметь минимальную длину печатных проводников в схеме и занимать как можно меньше места на плате. При встроенном в плату исполнении можно использовать двусторонний монтаж, что даст наибольшую экономию места на плате.

1.9 Заключение по главе

Multisim 10, программа, выбранная на первом этапе работы для проведения моделирования воздействия ЭСР на микросхемы не оправдала возложенных на нее ожиданий. Причины этому следующие: отсутствие возможности моделирования в пикосекундном диапазоне. Тем не менее, при помощи данной программы были получены результаты, очень близкие к реальному эксперименту.

Пришедшая ей на смену программа Microcap 9 имеет большие возможности по моделированию. В том числе, она способна работать в фемтосекундном диапазоне. Итогами моделирования в данной программе стали следующие выводы:

- Компьютерное моделирование воздействия ЭСР на ИМС возможно и достаточно достоверно.
- Модели микросхем и элементов, имеющиеся на данный момент в упомянутых выше программах, не предназначены для моделирования воздействия ЭСР.

- При создании развернутой модели микросхем необходимо обратить пристальное внимание на соответствие внутренних параметров элементов тем, которые характерны для реальных прототипов микросхем.
- При моделировании было установлено, что устойчивость микросхем к ЭСР, особенно по линии питания, значительно превышает реальную.
- Точность расчетов играет огромную роль в корректности моделирования.
- При выборе шага расчетов, обеспечивающего достоверность вычислений, как правило, этот шаг не более 500 пс, ресурсоемкость расчетов огромна. Современные компьютеры вполне способны справить с такой нагрузкой, сохраняя приемлемое время моделирования.

В целом итогом работы стала разработка методики моделирования воздействия ЭСР на ЭС.

В рамках данной работы была разработана и исследована модель одного из базовых встроенных элементов защиты КМОП микросхем – GGNMOST.

Чтобы определить параметры, которыми должна обладать защитная схема, в первой главе было определено, как два уровня защиты — конструкторский и схемотехнический — могут уберечь микросхемы от воздействия электростатического разряда. На основании этих данных и данных о чувствительности КМОП микросхем к помехам, были определены параметры, которыми должна обладать встроенная схема защиты.

Был проведен обзор существующих встроенных элементов КМОП.

Далее, был описан процесс разработки моделей. Сначала была разработана модель с усредненными параметрами активных компонентов модели и были исследованы зависимость статических и динамических характеристик модели от этих параметров.

Далее для верификации разработанной схемы защиты была разработана схема защиты на дискретных элементах, по принципу работы аналогичная встроенному элементу, а также ее модель. Верификация модели представляла собой снятие основных характеристик элемента – ВАХ и АЧХ. Для ее проведения был разработан испытательный стенд.

Верификация модели показала удовлетворительное соответствие модели реальной схеме защиты. ВАХ модели совпадала довольно точно с ВАХ реальной схема, а АЧХ реальной схемы было в 2 раза ниже, чем у модели. Но так как при моделировании воздействие испытательного стенда на проведение эксперимента не учитывалось, то можно считать, что модель довольно точно отражает поведение реальной схемы.

Были даны рекомендации по применению моделей элемента защиты GGNMOST в моделях цифровых микросхем, а также рекомендации по применению разработанной дискретной схемы защиты.

2 Разработка методов оценки надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов

Одной из групп показателей качества космических аппаратов, требования к которой постоянно возрастают, являются показатели надежности, такие как вероятность безотказной работы, срок активного существования (САС) и др. На ранних этапах проектирования для подтверждения требуемого уровня этих показателей используются расчетные методы, т.к. экспериментальная статистика отказов бортовой радиоэлектронной аппаратуры на этих этапах, как правило, отсутствует.

Для получения сопоставимых результатов расчетов надежности БРЭА КА как расчетные методы, так и исходные данные стандартизованы. В качестве примеров таких стандартов можно привести отечественные ОСТ-4Г0.012.242 [35]; ОСТ 4.012.013 [36] и Справочник «Надежность ЭРИ» [37].

Однако, постоянное усложнение БРЭА КА, рост предъявляемых к ней требований, ужесточение условий применения, повышение требований к САС, а так же повсеместное применение электрорадиоизделий (ЭРИ) иностранного производства (ИП) выдвигают задачу совершенствования расчетных методов оценки показателей надежности с целью повышения их точности, достоверности и воспроизводимости. В подтверждение вышесказанного можно привести, например, тот факт, что наряду со справочником [37] выпускается справочник «Надежность ЭРИ ИП» [38], в котором наряду с численными значениями характеристик надежности ЭРИ ИП приводятся и методы расчета их интенсивностей отказов.

Поэтому в данном разделе рассмотрены основные классификационные признаки БРЭА КА, механизмы влияния деструктивных факторов на ее надежность, а также основные аспекты разработанных методов оценки надежности БРЭА, размещаемой на современных КА.

2.1 Основные классификационные признаки бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов

Классифицировать БРЭА КА можно по различным признакам, но т.к. расчетная оценка ее надежности осуществляется в соответствии с требованиями комплекса российских военных стандартов «Мороз-6», то рассмотрим классификацию по признакам,

приведенным в ГОСТ РВ 39.304 [39], в соответствии с которым БРЭА, в зависимости от назначения и условий эксплуатации, подразделяют на группы, приведенные в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Группы бортовой радиоэлектронной аппаратуры

| Группа аппаратуры | Назначение и условия эксплуатации аппаратуры |
|----------------------|--|
| 1 | 2 |
| 5.1 | Аппаратура, предназначенная для установки в бытовых отсеках и отсеках с повышенной защитой космических аппаратов |
| 5.2 | Аппаратура, предназначенная для установки в герметизированных приборных отсеках и контейнерах космических аппаратов |
| 5.3 | Аппаратура, предназначенная для установки в негерметизированных отсеках, а также на внешней поверхности космических аппаратов с применением мер защиты |
| 5.4 | Аппаратура, предназначенная для установки на внешней поверхности космических аппаратов без применения мер защиты |

Аппаратуру групп 5.1-5.4 по принципу управления космическими аппаратами подразделяют на аппаратуру:

- пилотируемых космических аппаратов;
- автоматических космических аппаратов.

Аппаратуру групп 5.1-5.4 в зависимости от назначения и срока активного существования космических аппаратов подразделяют на группы исполнения в соответствии с данными, приведенными в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Группы бортовой радиоэлектронной аппаратуры и ресурс космических аппаратов

| Группа исполнения | Назначение аппаратуры | Срок активного существования (ресурс), ч |
|----------------------|---------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 5.A | Аппаратура, предназначенная для | До 10000 |

| | установки на КА с кратковременным сроком | |
|------|---|----------|
| | активного существования, работающая в | |
| | дежурном режиме | |
| | Аппаратура, предназначенная для | От 10000 |
| 5.Б | установки на КА со средним сроком активного | до 30000 |
| | существования, работающая в дежурном режиме | 7 |
| | Аппаратура, предназначенная для | |
| 5.B | установки на КА с длительным сроком | От 30000 |
| 3.13 | активного существования, работающая в | до 70000 |
| | дежурном режиме | |
| | Аппаратура, предназначенная для | |
| 5.Γ | установки на КА со сверхдлительным сроком | Свыше |
| 3.1 | активного существования, работающая в | 70000 |
| | дежурном режиме | |
| | Аппаратура, предназначенная для | |
| 5.Д | установки на КА, работающая в сеансном | По ТЗ |
| | режиме | |

Этапы и стадии эксплуатации БРЭА приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Этапы и стадии эксплуатации бортовой радиоэлектронной аппаратуры

| Э | гап эксплуатации | C | тадия эксплуатации |
|------|----------------------|------|-----------------------------------|
| Шифр | Характеристика | Шифр | Характеристика |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| | | 1.1 | Хранение |
| 1 | Эксплуатация в | 1.2 | Транспортирование |
| | наземных условиях | 1.3 | Испытания или обработка в |
| | | 1.5 | составе объекта |
| | | 2.1 | Выведение на орбиту |
| | | 2.2 | Орбитальный полет |
| 2 | Эксплуатация в | 2.3 | Старт с промежуточной орбиты |
| 2 | космических условиях | 2.4 | Полет по трассе |
| | | 2.5 | Ориентация, маневры, |
| | | 2.5 | коррекция, стыковка на орбите или |

| | | трассе |
|--|-----|------------------------------|
| | 2.6 | Торможение, спуск, посадка |
| | 2.7 | Работа на поверхности планет |
| | 2.7 | Солнечной системы и Луны |
| | 20 | Старт с планет Солнечной |
| | 2.8 | системы и Луны |

Бортовая радиоэлектронная аппаратура в течение всего срока эксплуатации должна быть стойкой, прочной и устойчивой при воздействии механических и климатических факторов, а также агрессивных сред, характеристики которых приведены в таблице 2.4 для различных этапов и стадий эксплуатации.

Таблица 2.4. Требования стойкости к бортовой космической аппаратуре

| Воздействующий | Характеристика | Этап, | Значение в | воздействующего | о фактора для аппа | ратуры групп | | |
|--------------------|--|------------------------|------------|-----------------|--------------------|--------------|--|--|
| фактор | воздействующего фактора | стадия эксплуатации | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | |
| Синусоидаль | Амплитуда ускорения, м/ c^2 (g) | 1.3; 2.1 | 100 (10) | , | | | | |
| ная вибрация | Диапазон частот, Гц | 110, 211 | 5-2000 | 5-2000 | | | | |
| Случайная | Среднеквадратиче ское значение | 1.3; 2.1 | По ТЗ | | | | | |
| вибрация | Диапазон частот, Гц | | 20-2000 | | | | | |
| Акустически | Диапазон частот, Гц | 1.3; 2.1 | 150-10000 | | | | | |
| й шум | Уровень звукового давления, дБ | 1.5, 2.1 | 150 | | | | | |
| Механическ | Пиковое ударное ускорение, M/c^2 (g) | 1.3; 2.1; | 1500 (150) | | | | | |
| ий удар одиночного | Длительность | 2.3; | | | | | | |
| действия | действия ударного ускорения, мс | 2.5-2.8 | 0,3-1 | | | | | |

| Механическ ий удар | Пиковое ударное ускорение, M/c^2 (g) | | 50 (5) | | | |
|-------------------------------|--|------------------|----------------------------|----------------------------|--|--|
| многократного действия | Длительность действия ударного ускорения, мс | 1.2 | 2-10 | | | |
| Линейное ускорение | Значение ускорения, м/c ² (g) | 1.3; 2.1 | 150 (15) | | | |
| Повышенное давление воздуха | Значение при эксплуатации, Па (мм рт. | 1.1-2.5 | 1,3•10 ⁵ (1000) | 3,1•10 ⁵ (2300) | _ | |
| или газа | ст.) | 2.6-2.8 | 1,3•10 ⁵ (1000) | 3,1•10 ⁵ (2300) | По ТЗ | |
| | | 1.2 | 1,2•10 ⁴ (9 | 90) | | |
| | | 1.3; 2.2; 2.3 | 4,7•10 ⁴ (350) | 4•10 ⁴ (300) | 1,3•10 ⁻⁴ (10 ⁻⁶) | 1,3•10 ⁻¹¹ (10 ⁻¹³) |
| Атмосферно е пониженное | Значение при эксплуатации, Па (мм рт. | 2.1 | 4,7•10 ⁴ (350) | 4•10 ⁴ (300) | 1,3•10-4 (10 |) ⁻⁶) |
| давление | ст.) | 2.4; 2.5 | 4,7•10 ⁴ (350) | 4•10 ⁴ (300) | 1,3•10 ⁻⁷ (10 ⁻⁹) | 1,3•10 ⁻¹¹ (10 ⁻¹³) |
| | | 2.6-2.8 | 4,7•10 ⁴ (350) | 4•10 ⁴ (300) | По ТЗ | |
| Изменение давления воздуха | Скорость изменения давления, Па/с | 2.1-2.8 | 2,7•10 ³ (2 | 20) | | |

| или газа | (мм рт. ст./с) | | | | | |
|------------------|---------------------------------------|-----------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | | | 1,3•10 ⁵ - | 3,1•10 ⁵ - | | |
| | | 2.1-2.5 | 4,7•10 ⁴ | 4•10 ⁴ | | |
| | Пуражаразу | 2.1-2.3 | (1000- | (2300- | _ | |
| | Диапазон | | 350) | 300) | | |
| | изменения частот, Па (мм | | 1,3•10 ⁵ - | 3,1•10 ⁵ - | | |
| | рт. ст.) | 2.6-2.8 | 4,7•10 ⁴ | 4•10 ⁴ | По ТЗ | |
| | | 2.0-2.8 | (1000- | (2300- | 110 13 | |
| | | | 350) | 300) | | |
| Порумурума | 2vovovvo wav | 1.1-2.5 | 1,3•10 ⁵ | 3,1•10 ⁵ | | |
| Повышенное | Значение при эксплуатации, Па (мм рт. | 1.1-2.3 | (1000) | (2300) | _ | |
| давление воздуха | ст.) | 2.6-2.8 | 1,3•10 ⁵ | 3,1•10 ⁵ | По ТЗ | |
| или газа | (1.) | 2.0-2.8 | (1000) | (2300) | 110 13 | |
| | | 1.2 | 1,2•10 ⁴ (9 | 90) | | |
| | | 1.3; 2.2; | 4,7•10 ⁴ | 4•10 ⁴ | 1,3•10 ⁻⁴ | 1,3•10 ⁻¹¹ |
| | | 2.3 | (350) | (300) | (10^{-6}) | (10^{-13}) |
| Атмосферно | Значение при | 2.1 | 4,7•10 ⁴ | 4•10 ⁴ | 1,3•10 ⁻⁴ (10 | ŋ-6 _\ |
| е пониженное | эксплуатации, Па (мм рт. | 2.1 | (350) | (300) | 1,5*10 (10) | |
| давление | ст.) | 2.4.2.5 | 4,7•10 ⁴ | 4•10 ⁴ | 1,3•10 ⁻⁷ | 1,3•10 ⁻¹¹ |
| | 2.4; 2.5 | (350) | (300) | (10 ⁻⁹) | (10^{-13}) | |
| | | 2629 | 4,7•10 ⁴ | 4•10 ⁴ | По ТЗ | 1 |
| | | 2.6-2.8 | (350) | (300) | 110 13 | |

| | Скорость | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|---------|-----------------------|-----------------------|----------|------------|--|--|
| | изменения давления, Па/с | 2.1-2.8 | $2,7 \cdot 10^3 (20)$ | | | | | |
| | (мм рт. ст./с) | | | | | | | |
| | | | 1,3•10 ⁵ - | 3,1•10 ⁵ - | | | | |
| Изменение | | 2.1-2.5 | ,7•10 ⁴ | 4•10 ⁴ | | | | |
| давления воздуха | Путомором | 2.1-2.3 | (1000- | (2300- | - | | | |
| или газа | Диапазон | | 350) | 300) | | | | |
| | изменения частот, Па (мм | | 1,3•10 ⁵ - | 3,1• 0 ⁵ - | | | | |
| | рт. ст.) | 2.6-2.8 | 4,7•10 ⁴ | 4•10 ⁴ | По ТЗ | | | |
| | | 2.6-2.8 | (1000- | (2300- | 110 13 | | | |
| | | | 350) | 300) | | | | |
| | Рабочая, °С | 1.3; 2 | 40 | | 50 | 125 | | |
| Повышенная | | 1.1 | 35 | | 1 | | | |
| температура среды | Предельная, °С | 1.2 | 50 | | | | | |
| | | 1.3; 2 | 50 | | 60 | 125 | | |
| | Рабочая, °С | 1.3; 2 | Минус 10 | 0 | Минус 50 | Минус 150 | | |
| Пониженная | | 1.1 | 5 | | J | | | |
| температура среды | Предельная, °С | 1.2 | Минус 50 | 0 | | | | |
| | | 1.3; 2 | Минус 50 | | | Минус 150 | | |
| 11 | Диапазон | 1.2 | От минус 50 до 5 | | | | | |
| Изменение | изменения температуры, | 1.2.2 | | | От минус | От минус | | |
| температуры среды | °C | 1.3; 2 | От минус | с 10 до 40 | 50 до 50 | 150 до 125 | | |

| | Относительная влажность, % | 1.3-2.1 | 98 | _ | 98 | |
|------------------------------|---|---------|----------|-------------|-----|-------------|
| Повышенная | Температура, °С | | 20 | _ | 25 | |
| влажность воздуха | Относительная влажность, % | 2.2-2.8 | 98 | _ | | |
| | Температура, °С | | 20 | _ | | |
| Пониженная влажность | Точка росы, °С | 1.3; 2 | _ | Минус 40 | _ | |
| Солнечное излучение | Плотность потока, Вт/м ² : интегральная ультрафиолетовог о излучения | 1; 2 | <u>-</u> | | | 1400 140 |
| Компоненты ракетного топлива | Массовая концентрация, мг/м ² | 2.1 | _ | | 5,0 | |
| Среда заполнения: | Объемная доля, % | 2 | | | | |
| азот (N ₂) | | | До 78 | До 90 | _ | |
| кислород (O ₂) | | | До 40 | От 4 до | _ | |
| водород (Н2) | | | До 2 | До 20 | _ | |

| углекислый газ (CO ₂) | | | До 3 | - | _ | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-------|------|---|---|--|
| аргон (Аг) | Остаточное содержание, % | 1 и 2 | 1,5 | | _ | |
| Испытательн ая среда | Содержание, % | 1 | 90 | | _ | |
| (аргон) | Продолжительност ь воздействия, ч | 1 | 300 | | _ | |

Примечания:

- Период эксплуатации состоит из этапов и стадий эксплуатации, содержание которых приведено в таблице 2.3.
- В ТЗ оговаривают концентрацию кислорода при верхнем значении температуры внешней среды при заданной длительности воздействия, при этом значения температуры и влажности могут быть меньше, чем указаны в таблице 2.4.

К аппаратуре групп 5.1-5.4, предназначенной для работы на возвращаемых и спускаемых на Землю и другие планеты космических аппаратов, кроме требований, указанных в таблице X.4, предъявляют дополнительные требования по механическим и другим специфическим внешним факторам, оговариваемые в ТЗ.

K аппаратуре групп 5.1, 5.2 на стадии эксплуатации 1.1 (см. табл. X.3) дополнительно устанавливают требование по повышенной предельной температуре 45 0 C продолжительностью 45 сут. в течение одного года.

К аппаратуре групп 5.1-5.3 на стадии эксплуатации 1.2 дополнительно устанавливают требования по предельной повышенной температуре $60~^{0}$ С и предельной пониженной температуре минус $60~^{0}$ С продолжительностью 15 сут. в течение одного года.

Для аппаратуры группы 5.4, предназначенной для установки на теплоизолированных платформах или выносных штангах, повышенную температуру (рабочую и предельную) устанавливают равной $200~^{0}$ С, пониженную температуру (рабочую и предельную) - минус $200~^{0}$ С.

К бортовой радиотехнической, радиолокационной аппаратуре и аппаратуре средств связи космической техники требования стойкости, прочности и устойчивости к воздействию механического удара одиночного действия допускается устанавливать в ТЗ по согласованию с Заказчиком.

Для аппаратуры групп 5,3 и 5.4, не имеющей трущихся или контактирующих деталей, испытания при проверке выполнения заданных требований по пониженному давлению проводят при давлении газовой среды ниже 1,3•10-3 Па (10-5 мм рт. ст.), а для аппаратуры, имеющей трущиеся или контактирующие детали, - при давлении 1,3•10-7 Па (10-9 мм рт. ст.).

Для аппаратуры групп 5.1-5.4 на стадии эксплуатации 1.3 требования к воздействию сред стерилизации устанавливают в Т3.

Кроме вышеперечисленных факторов, аппаратура должна быть стойкой к воздействию электростатического разряда (ЭСР), а так же к воздействию ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП).

2.2 Методы учета влияния механических и климатических факторов на надежность БРЭА КА

Приведенная выше классификация устанавливает связь между группами аппаратуры (см. таблицу 2.4) и характеристиками надежности ЭРИ.

Для учета степени жесткости условий эксплуатации в математические модели эксплуатационной интенсивности отказов справочника [37] введен коэффициент Кэ (коэффициент эксплуатации), который показывает, во сколько раз интенсивность отказов ЭРИ в аппаратуре конкретного класса (группы эксплуатации по ГОСТ РВ 20.39.304 [39]) выше при всех прочих равных условиях, чем в наземной стационарной аппаратуре (группа 1.1). Значения коэффициента эксплуатации для различных классов ЭРИ приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Значения Кэ по группам аппаратуры

| Класс ЭРИ | Группа | аппарат | гуры | |
|--|--------|---------|------|-----|
| Khace Of Fi | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Интегральные микросхемы | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Полупроводниковые приборы | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Оптоэлектронные полупроводниковые приборы | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Изделия квантовой электроники | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Генераторные, модуляторные, регулирующие лампы | 0,7 | 0,7 | 4 | 4 |
| Газоразрядные приборы и высоковольтные кенотроны | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Трубки электронно-лучевые | 1 | 1 | 4 | 4 |
| приемные и преобразовательные | 1 | 1 | 7 | 7 |
| Знакосинтезирующие индикаторы | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Приборы фотоэлектронные | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Приборы фотоэлектрические | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Приборы пьезоэлектрические и фильтры | 1 | 1 | 4 | 4 |
| электромеханические | | | - | - |
| Резисторы | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Конденсаторы | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Трансформаторы | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Дроссели | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Линии задержки | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Лампы накачки | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Источники высокоинтенсивного оптического | 1 | 1 | 4 | 4 |
| излучения | 1 | 1 | | |
| Компоненты волоконно-оптических систем передачи | 1 | 1 | 4 | 4 |

| информации | | | | |
|--|---|---|----|----|
| Коммутационные изделия | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Установочные изделия | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Соединители низкочастотные и радиочастотные | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Электровакуумные приборы и модули СВЧ | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Приборы ферритовые СВЧ | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Аппараты электрические низковольтные | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Машины электрические малой мощности | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Силовые полупроводниковые приборы | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Электрические кабели, провода, шнуры | 1 | 1 | 15 | 15 |
| Химические источники тока | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Лампы электрические | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Соединения | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Платы с металлизированными сквозными отверстиями | 1 | 1 | 4 | 4 |

Как видно из таблицы 2.5 для нерезервированной БРЭА средняя наработка групп 5.3, 5.4 будет, как минимум, в 4 раза меньше, чем у той же аппаратуры группы 1.1.

Следует отметить, что уровни внешних воздействующих факторов (ВВФ), приведенные в таблице 2.4, характеризуют место установки аппаратуры, однако уровни тех же ВВФ в месте установки ЭРИ могут отличаться в десятки и сотни раз [40].

Методики, приведённые в справочнике [37], отчасти позволяют разрешить эту проблему следующим образом: значение K_{\Im} следует выбирать не для группы эксплуатации БР \Im А, заданной в Π 3, а предварительно, на основе номенклатуры ВВ Φ , действующих на \Im РИ, и их характеристик в месте его установки по данным Π 0СТ РВ 20.39.304 [39] идентифицировать новую группу эксплуатации. И только после этого выбирать значение Π 40.

Однако не всегда удаётся подобрать группу эксплуатации, т.к. уровни ВВФ в месте установки ЭРИ могут не совпадать с диапазонами изменения ВВФ той или иной группы. Кроме того, и в ТЗ на аппаратуру довольно часто встречается требования вида: «Группа эксплуатации аппаратуры по ГОСТ РВ 20.39.304 - X.X, за исключением...», после чего идет перечень тех ВВФ и их характеристик, которые не совпадают с приведёнными в ГОСТ РВ 20.39.304 [39].

В этом случае целесообразно перейти от интегральной оценки влияния ВВФ к дифференцированной, т.е. расчетную оценку значения $K_{\rm B}$ проводить не по совокупности

ВВФ, а по каждому фактору в отдельности, тем более, что методы математического моделирования физических процессов, позволяющие определить уровень воздействия каждого ВВФ в месте установки ЭРИ к настоящему времени достаточно хорошо развиты и автоматизированы [40]. В этом случае расчет значения К_Э проводится в следующей последовательности [41]:

- 1. Для каждого j-того BBФ i-того вида формируется вектор номеров всех возможных групп эксплуатации по классификации ГОСТ PB 20.39.304 [39], исходя из условия, что рабочее (расчетное) значение этого BBФ, действующее на ЭРИ ($z_{i,j}^{\text{pa6}}$) принадлежит области изменения этого BBФ, действующего в месте установки ЭС, заданной для k-той группы в ГОСТ PB 20.39.304 [42].
- 2. Для каждого j-того BBФ i-того вида по таблицам справочника [37] определяются численные значения $K_{\ni}(\mathbf{z}_{i,j}^{k})$ для выбранных групп эксплуатации.
 - 3. Для каждого j-того BBФ i-того вида определяется значение $K_{\mathfrak{I}}(\mathbf{z}_{i,j}^{\text{paб.}})$ как:

$$K_{s}(z_{i,j}^{pa6}) = \min_{j=1,J_{i}} \{K_{s}(z_{i,j}^{k})\},$$
(2.1)

4. Рассчитывается значение Кэ:

$$K_{9} = -\ln\left\{1 - \sum_{i=1}^{4} \left[\frac{n_{i}}{100} \cdot \left[\sum_{j=1}^{J_{i}} \frac{m_{i,j}}{100} \cdot \left[1 - \exp\left\{-K_{9}\left(z_{i,j}^{pa6}\right)\right\}\right]\right]\right]\right\},$$
(2.2)

где: n_i - процент отказов по i-тому виду $BB\Phi$; i - номер вида $BB\Phi$ (климатические воздействия - i = 1, механические воздействия - i = 2, компоненты ракетного топлива - i = 3, солнечное излучение - i = 4); $m_{i,j}$ - процент отказов по j-тому типу $BB\Phi$ i-того вида; j - номер типа $BB\Phi$ (j = 1, J_i); J_i - количество типов $BB\Phi$ i-того вида (см. таблицу 2.4).

Следует отметить, что в отличие от метода справочника [37], где в качестве исходных данных использовались исключительно справочные данные, в данном случае значения n_i и $m_{i,j}$ должны быть получены по результатам испытаний и (или) подконтрольной эксплуатации самими предприятиями-разработчиками бортовой космической аппаратуры (БКА).

На рис. 2.1 приведена диаграмма типового распределения отказов БРЭА по видам воздействий.

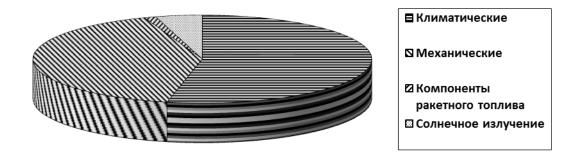


Рис. 2.1. Диаграмма распределения отказов БКА по видам воздействий

2.3 Методы учета влияния электростатического разряда на надежность БРЭА КА

Общеизвестно, что отрицательное влияние электростатического разряда в первую очередь сказывается БРЭА, содержащую МОП- и КМОП-приборы.

Однако перечень полупроводниковых ЭРИ, особо чувствительных к воздействию электростатического разряда, не ограничивается указанными типами. Некоторые биполярные приборы также чувствительные к ЭСР. По вине электростатического разряда в цифровых интегральных микросхем (ИМС) наблюдается деградация параметров входных диодов.

Особенно опасны электростатического разряда для ТТЛ ИМС с барьером Шоттки, которые пробиваются при энергии электростатического разряда в 2-3 раза меньшей, чем необходимо для пробоя ТТЛ ИМС. Это происходит вследствие меньшего размера барьера Шоттки.

Пороги чувствительности полупроводниковых приборов и ИМС приведены в таблице 2.6, а относительная чувствительность различных типов ИМС к величине электростатического разряда - в таблице 2.7.

Таблица 2.6. Пороги чувствительности полупроводниковых приборов и ИМС

| Тип ЭРИ | Пороги чувствительности, [В] | | |
|------------------------------|------------------------------|--|--|
| 1 | 2 | | |
| МОП-транзистор | 100 - 200 | | |
| Арсенид-галлиевый транзистор | 100 - 200 | | |

| Полевой транзистор с управляющим переходом | 140 - 10000 |
|--|-------------|
| Биполярный транзистор | 380 - 7000 |
| КМОП ИМС | 250 - 3000 |
| Линейные биполярные ИМС | 190 - 2500 |
| ИС ТТЛ | 1000 - 2500 |
| ИС ЭСЛ | 500 - 1500 |
| ИС ТТЛШ | 500 - 1500 |

Таблица 2.7. Относительная чувствительность различных типов ИМС

| Тип ИС | Относительная | |
|--|------------------|--|
| тип ис | чувствительность | |
| 1 | 2 | |
| Стандартные ТТЛ ИС | 1,0 | |
| Линейные ИС | 1,3 | |
| Цифровые ИС с объединёнными эмиттерами | 1,8 | |
| ТТЛ ИС с диодами Шоттки | 3,0 | |
| МОП ИС | 3,0 | |
| КМОП ИС | 4,6 | |

На рис. 2.2, в качестве примера, приведены результаты эксперимента по установлению величин электростатических разрядов соответствующей полярности, влияющих на изменение вольтамперных характеристик и отказ биполярных больших интегральных схем (БИС) серии 1005.

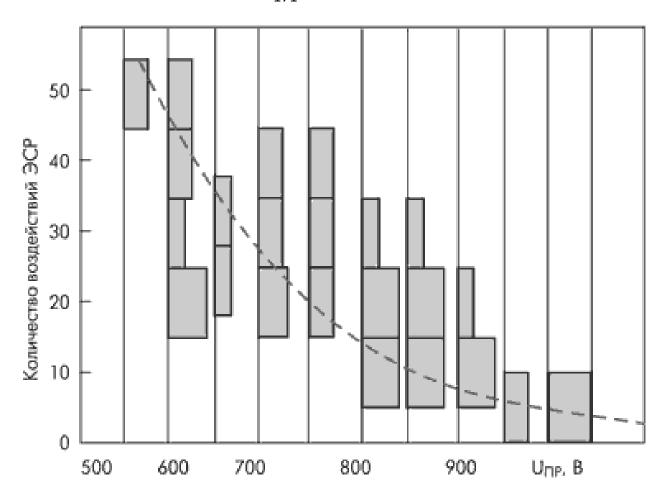


Рис. 2.2. Зависимость отказов БИС серии 1005 от числа воздействий и величины электростатического разряда

Развитие отказов в КМОП ИС, связанных с воздействием статического электричества, не зависит от степени интеграции и определяется реальным уровнем стойкости конкретной микросхемы (за счет соответствующих схемотехнических и технологических решений) и условиями ее применения, зависящими только от изготовителя БРЭА.

При расчетах надежности БРЭА на КМОП ИС влияние ЭСР учитывается слагаемым λ_{EOS} , которое входит в математическую модель интенсивности отказов, приведенную в стандарте MIL-HDBK-217F [34]. λ_{EOS} характеризует устойчивость микросхем к воздействию разряда статического электричества. Аргументом функции λ_{EOS} является стойкость к воздействию электростатического разряда (V_{TH}):

$$\lambda_{EOS} = -\frac{\ln\left[K_{EOS}^{1} - K_{EOS}^{2} \cdot \exp\left(-K_{EOS}^{3} \cdot V_{TH}\right)\right]}{K_{EOS}^{4}}$$
(2.3)

где: K_{EOS}^1 , K_{EOS}^2 , K_{EOS}^3 , K_{EOS}^4 - постоянные коэффициенты; V_{TH} - стойкость к воздействию электростатического разряда.

Так, например, КМОП СБИС, разрабатываемых и изготавливаемых в базовом технологическом процессе изготовления микросхем с минимальным топологическим размером 0,35 мкм, значение λ_{EOS} - не более 4,4·10⁻⁹ ч⁻¹.

На рис. X.3 приведен график зависимости $\lambda_{EOS} \cdot 10^{-6}$ от V_{TH} , построенный по модели (2.3).

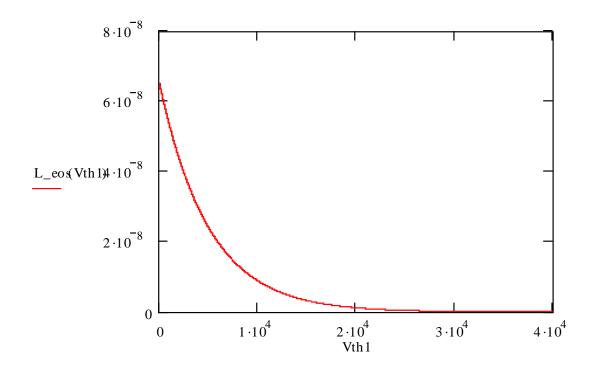


Рис. 2.3. Зависимость λ_{EOS} от V_{TH}

Как видно из графика, при увеличении V_{TH} интенсивность отказов снижается. Поэтому, при конструировании БРЭА на КМОП ИС следует применять микросхемы с высокой стойкостью к воздействию электростатического разряда [35].

Значения V_{TH} могут быть получены на основе данных, приведенных в Device reliability report фирм-производтелей. На рис. 2.4 приведен фрагмент Device reliability report компании XILINX.

Table 1-8: Product ESD and Latch-up Data

| Device | Latch-up | Human Body Model | Charge Device Model |
|--------------------|-----------------|------------------------------------|---|
| XC17xxxD/L | <u>+</u> 200 mA | <u>+</u> 2,000V | +2,000V ⁽¹⁾ |
| XC17xxxE, XC17Sxxx | <u>+</u> 210 mA | <u>+</u> 2,000V | <u>+</u> 1,000V ⁽²⁾ |
| XC17Vxxx | <u>+</u> 200 mA | <u>+</u> 2,000V | <u>+</u> 500V |
| XC18Vxxx | <u>+</u> 200 mA | <u>+</u> 2,000V | ±500V ⁽³⁾ |
| XC31xxx/A | <u>+</u> 250 mA | <u>+</u> 1,750V to <u>+</u> 8,000V | ±1,000V ⁽⁴⁾ |
| XC3xxx/A | <u>+</u> 220 mA | <u>+</u> 4,000V to <u>+</u> 7,000V | ±2,000V ⁽⁵⁾ |
| XC4xxx/A | <u>+</u> 300 mA | <u>+</u> 1,000V to <u>+</u> 8,000V | ±2,000V ⁽⁶⁾ |
| XC4xxxE | <u>+</u> 250 mA | <u>+</u> 3,000V to <u>+</u> 8,000V | ±2,000V ⁽⁷⁾ |
| XC4xxxEX | <u>+</u> 250 mA | <u>+</u> 3,000V to <u>+</u> 7,000V | ±2,000V ⁽⁸⁾ |
| XC4xxxXL | <u>+</u> 250 mA | ±2,000V to ±8,000V | ±1,000V ⁽⁹⁾ |
| XC4xxxXLA | <u>+</u> 260 mA | ±2,000V to ±7,000V | ±500V (Core)/±1,000V (corner) ⁽¹⁰⁾ |
| XCVxxx | <u>+</u> 200 mA | ±1,000V to ±2,000V | ±500V ⁽¹¹⁾ |

16 <u>www.xilinx.com</u> Reliability Report UG116 (v9.1) August 22, 2012

Рис. 2.4. Фрагмент Device reliability report компании XILINX

T.к. Device reliability report обновлются раз в квартал, то для получения достоверной информации о величине V_{TH} необходимо проводить мониторинг данных о характеристиках надежности ЭРИ [10].

2.4 Методы учета влияния теплового режима на надежность БРЭА КА

Тепловой режим БРЭА в значительной степени определяет показатели ее надежности. Так, например, увеличение температуры ЭРИ с 60 °C до 80 °C снижает среднее время наработки на отказ БРЭА почти в 2 раза (см. рис. 2.5).

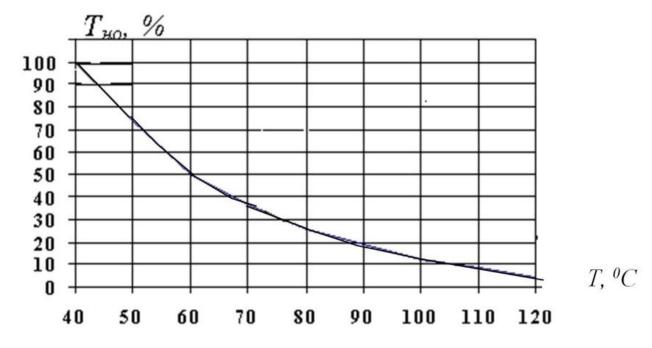


Рис. 2.5. Типовая зависимость относительного изменения среднего времени наработки на отказ (T_{HO}) от температуры

Однако, обеспечение тепловых режимов работы ЭРИ с точки зрения требований технических условий (ТУ) является необходимой, но далеко не достаточной гарантией обеспечения требований по надежности БРЭА. Это связано с тем, что в модели эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ входят коэффициенты, зависящие от рабочей температуры элемента.

Математические модели этих коэффициентов основаны на законе Аррениуса, который применяется для описания температурной составляющей деградационного процесса. С.А. Аррениус впервые ввел понятие «активационного комплекса» в статистическую теорию скоростей химических реакций в растворах.

Согласно этой теории процессу химического взаимодействия предшествуют более быстрые процессы «активации» и установления статистического равновесия. При этих условиях оказывается справедливым уравнение Аррениуса, описывающее зависимость константы скорости химической реакции (K_D) от абсолютной температуры:

$$K_{p}(T) = A \cdot exp\left(-\frac{E_{A}}{k \cdot T}\right) \tag{2.4}$$

где: $K_p(T)$ - константа скорости химической реакции; A - частота столкновений реагирующих молекул; E_A - энергия активации; k- постоянная Больцмана; T - температура.

Величина $\exp[-E_A/(k\cdot T)]$ характеризует вероятность того, что частицы имеют энергию, достаточную для вступления в реакцию, или долю активных столкновений при температуре T; коэффициент A является частотным фактором, означающим общее количество столкновений; постоянная E_A определяется для каждого процесса его особенностями.

При моделировании постепенных отказов в твердых телах, возникающих в результате деградационных процессов, положения теории скоростей химических реакций часто «переносятся» и на эти процессы. Широкий круг физико-химических процессов, помимо чисто химических реакций, связан с изменением концентрации вещества в результате переноса частиц и их взаимодействия (например, диффузия в объеме и на поверхности кристалла и корпуса ИС, перемещение элементарных точечных и линейных дефектов и др.), удовлетворяет основным законам этой теории. Аналогия деградационных процессов в твердых телах химическим реакциям подсказывает простой способ моделирования температурной зависимости времени до отказа t(T_J) в виде экспоненциальной функции:

$$t(T_{J}) = \frac{t_{0}}{K_{p}} = \frac{t_{0}}{A \cdot exp\left(-\frac{E_{A}}{k \cdot T_{J}}\right)} = \frac{t_{0}}{A} \cdot exp\left(\frac{E_{A}}{k \cdot T_{J}}\right)$$
(2.5)

где: t_0 - время до отказа; K_p - константа скорости химической реакции; E_A - энергия активации; k- постоянная Больцмана; T_J - температура кристалла (кристаллической решетки).

Эта аналогия не формальна и находит практическое подтверждение при анализе реальных деградационных процессах в твердых телах. Однако на практике вместо $K_p(T_J)$ используют отношение $K_p(T_J)/K_p(T_0) = K_T$, которое показывает, во сколько раз время до отказа при температуре T меньше, чем при температуре T_0 . При этом за T_0 принимают температуру кристалла, соответствующую «нормальным условиям, равную 298 °К. Тогда:

$$K_{T} = \frac{K_{p}(T_{j})}{K_{p}(T_{0})} = \frac{A \cdot e^{-\frac{E_{A}}{k \cdot T_{j}}}}{A \cdot e^{-\frac{E_{A}}{k \cdot T_{0}}}} = exp\left(-\frac{E_{A}}{k \cdot T_{j}} + \frac{E_{A}}{k \cdot T_{0}}\right) = exp\left[-\frac{E_{A}}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_{j}} - \frac{1}{T_{0}}\right)\right], \tag{2.6}$$

где: K_p - константа скорости химической реакции; E_A - энергия активации; k - постоянная Больцмана; T_j - рабочая температура кристалла (кристаллической решетки); T_0 - номинальная температура кристалла (кристаллической решетки).

Выражение (X.6) используется для оценки коэффициента ускорения при проведении испытаний ИС. На рис. 2.6, в качестве примера, приведен фрагмент Device

reliability report компании XILINX, содержащий интенсивности отказов кристаллов ИС семейства XC4VxXxxx.

| Device | Lot Quantity | Fail Quantity | Device Quantity | Actual Device Hours at T _J ≥ 125°C | Equivalent Device Hours at T _J = 125°C | Failure Rate at 60% CL and T _J = 55°C (FIT) |
|-----------|-----------------|------------------|--------------------|---|---|--|
| XC4VLX60 | 5 | 1(1) | 226 | 344,295 | 719,573 | |
| XC4VLX80 | 3 | 0 | 165 | 265,545 | 712,858 | |
| XC4VLX100 | 1 | 0 | 45 | 90,855 | 259,245 | |
| XC4VFX60 | 1 | 0 | 42 | 84,630 | 182,316 | |
| XC4VSX25 | 1 | 0 | 37 | 75,757 | 100,039 | |
| XC4VSX55 | 1 | 0 | 45 | 90,045 | 222,731 | |
| XC4VxXxxx | 12 | 1 | 560 | 951,127 | 2,196,762 | 12 FIT |

Table 2-24: HTOL Test Results for 0.09 µm Si Gate CMOS Device Type XC4VxXxxx

Notes:

Рис. 2.6. Интенсивность отказов кристаллов ИС семейства XC4VxXxxx

Выражение (2.6) в том или ином виде входит в математические модели коэффициентов, учитывающих влияние температуры на интенсивность отказов ЭРИ. Так, например, в стандарте MIL-HDBK-217F [34] для класса «Интегральные микросхемы» приведена следующая математическая модель коэффициента (π_T), учитывающего величину температуры окружающей среды:

$$\pi_T = a \cdot exp \left[-\frac{E_A}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \tag{2.7}$$

где: E_A - энергия активации; k - постоянная Больцмана; T_j - температура кристалла, T_0 - $298\,^0$ K; a - эмпирический коэффициент.

В справочнике «Надежность ЭРИ» [37] для учета величины температуры окружающей среды используется коэффициент K_p ($K_{c,T}$). Так, например, математическая модель коэффициента $K_{c,T}$, учитывающего величину температуры, для класса «Интегральные микросхемы» имеет вид:

$$K_{CT} = A \cdot exp[B \cdot (T + 273)], \tag{2.8}$$

где А, В - постоянные коэффициенты модели; Т - температура окружающей среды.

Аналогичные модели приведены и для других классов ЭРИ. Таким образом, математические модели коэффициентов π_T , K_p ($K_{c,T}$) показывают, что рабочие

^{1.} Failure due to substrate defect. Process improvement has been implemented.

температуры ЭРИ существенно влияют на их надежность, а, следовательно, и на надежность БРЭА в целом.

2.5 Методы учета влияния ионизирующих излучений космического пространства на надежность БРЭА КА

Влияние ИИ КП на работоспособность БРЭА КА настолько существенно, что в отличие от всех остальных деструктивных воздействий, задача обеспечения радиационной стойкости БРЭА выделено в самостоятельную задачу, такую же, как обеспечение надежности.

Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам приведены в РД 134-0139 [45]. В этом стандарте также приведены «типовые» значения параметров чувствительности ЭРИ к одиночным эффектам при воздействии заряженных частиц. Однако использование «типовых» параметров при оценке сбое- и отказоустойчивости дает большой разброс, а результаты расчетов далеки от действительности, т.к. значения параметров ЭРИ не обновлялись с 2005 года и с тех пор сильно устарели.

Методы оценки стойкости БРЭА к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам приведены в ОСТ 134-1034 [46]. Расчет стойкости БРЭА по ОСТ 134-1034 [46] проводится «поэлементным» методом и заключается в сравнении уровня стойкости каждого типа ЭРИ с уровнем радиационного воздействия на него (поглощенных доз электронов, протонов и суммарной дозы), определенного расчетным путем. Уровень радиационных воздействий на БРЭА зависит от мест ее размещения на КА, классификация которых приведена в табл. 2.1.

Результатом оценки является коэффициент запаса по радиационной стойкости (K_3). В соответствии с ОСТ 134-1034 [12] ЭРИ имеет высокую предельную накопленную дозу, если $K_3 \geq 3$. Если же $1 < K_3 < 3$, то необходимо проведение испытаний в составе аппаратуры, причем, желательно, сначала испытать до заданного в ТЗ уровня, а потом до отказа.

Тем не менее, при расчете надежности БРЭА все же учитывается влияние ИИ КП. Для этого в математические модели эксплуатационной интенсивности отказов справочника «Надежность ЭРИ» [37] введен коэффициент К_{ии} (коэффициент ионизирующих излучений), который учитывает влияние воздействующих ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения на надежность ЭРИ.

Ориентировочные значения коэффициента ионизирующих излучений приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8. Значения Кии при величине дозы ионизирующего излучения

| Доза, крад | 0-10 | 20 | 40 |
|------------|------|-------|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Кии | 1 | 1,035 | 1,1 |

Примечание:

при отсутствии статистических данных об указанном воздействии следует принимать $K_{\text{ии}}=1.$

Относительно небольшие значения $K_{\mu\nu}$ свидетельствуют не о том, что ИИ КП не влияет на надежность ЭРИ и БКА в целом, а подтверждают тот факт, что в БКА должны применяться только радиационно-стойкие ЭРИ и (или) конструкция БКА должна обеспечивать требуемый уровень их защиты от ИИ КП.

2.6 Методики расчета показателей надежности электронных модулей БРЭА КА

Рассмотренные выше методы учета влияния деструктивных факторов на надежность БРЭА, хотя и позволяют обеспечить выполнение требований ТУ на ЭРИ по тепловым режимам, стойкости к ЭСР, ИИ КП, и др. воздействиям, но не гарантирует обеспечения требований по надежности. Поэтому расчеты показателей надежности БРЭА должны проводиться на всех этапах ее разработки [47]. Поскольку основными конструктивными единицами БРЭА является электронные модули (ЭМ), то очевидно, что именно их характеристики надежности в значительной степени определяют и надежность БРЭА в целом.

Что касается непосредственно показателей надежности, то особое значение для БРЭА имеют показатели безотказности, которые характеризуют свойство БРЭА непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение заданного времени (или наработки) и показатели долговечности, которые определяют САС. Поэтому ниже приведены методики расчетной оценки именно этих показателей для электронных модулей 1-го уровня (ЭМ1).

2.6.1 Методика расчета безотказности электронных модулей БРЭА КА

Методика предназначена для проведения приближенного и уточненного расчета показателей безотказности электронных модулей.

Приближенный расчет проводится с целью уточнения предельно-допустимых режимов работы ЭРИ аналитическим путем и формулирования требований ЧТЗ к составным частям на стадии эскизного или технического проекта.

Приближенный расчет проводится при отсутствии реальных режимов работы ЭРИ. Результаты приближенного расчета показателей безотказности входят в состав пояснительной записки по разработке аппаратуры.

Уточненный расчет показателей безотказности ЭМ1 проводится с целью определения аналитическим путем показателей безотказности с учетом реальных режимов работы ЭРИ, которые должны быть внесены в карты рабочих режимов (КРР), оценки их соответствия требованиям ТУ и ЧТЗ. Уточненный расчет показателей безотказности проводится на стадии разработки рабочей документации опытного образца и является составной частью отдельного документа РР01, входящего в состав КД.

Расчет показателей безотказности проводится при допущении условия, что интенсивность отказов ЭМ1 во времени является величиной постоянной, что имеет место в период нормальной эксплуатации аппаратуры, когда справедлива экспоненциальная модель отказов (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Зависимость интенсивности отказов от времени

ЭМ1 не имеет структурной избыточности.

Расчет показателей безотказности сводится к определению следующих основных показателей:

- Т₀ средняя наработка до отказа;
- $P(t_3)$ вероятность безотказной работы за время непрерывной работы t_3 .

Расчет показателей безотказности ЭМ1, в соответствии с ОСТ-4Г0.012.242 [48], проводится следующей последовательности:

- 1. Формулируется критерий отказа ЭМ1 из условия обеспечения нормального функционирования.
- 2. Рассчитывается интенсивность отказов ЭМ, как сумма интенсивностей отказов комплектующих ЭРИ по формуле:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{I} \lambda_i \tag{2.9}$$

где λ_i - интенсивность отказов і-го ЭРИ; І - общее число ЭРИ в ЭМ.

Значения интенсивностей отказов ЭРИ рассчитываются по методикам справочника [37] с применением методов учета влияния деструктивных факторов, приведенных выше, в п.п. 2.2- 2.5.

Для ЭМ1, которые входят в состав БРЭА, работающей в «сеансном» режиме (см. табл 2.2), значение эксплуатационной интенсивности отказов определяется для всех режимов применения (нагруженного, облегченного, ненагруженного).

$$\Lambda_{\rm HP} = \Lambda_{\rm Xp}$$
,

где Λ_{Xp} - интенсивность отказов в режиме хранения.

Интенсивности отказов ЭМ1 в режиме хранения рассчитываются по методикам справочника [37].

Для «сеансного» режима работы, когда ЭМ1 в составе БРЭА в общем случае может находиться в режиме работы (нагруженном), ожидания (облегченном), хранения (ненагруженном), $\Lambda_{\rm C}$ рассчитывается по формуле [49]:

$$\Lambda_{C} = \frac{\Lambda_{PP} \cdot t_{\Sigma pp} + \Lambda_{OP} \cdot t_{\Sigma op} + \Lambda_{HP} \cdot t_{\Sigma \mu p}}{t_{\Sigma pp} + t_{\Sigma op} + t_{\Sigma \mu p}},$$
(2.11)

где: Λ_{PP} , Λ_{OP} , Λ_{HP} - интенсивности отказов ЭМ1 в режиме работы, облегченном режиме и ненагруженном режиме; $t_{\Sigma pp}$, $t_{\Sigma op}$, $t_{\Sigma hp}$ - суммарные времена нахождения ЭМ1 в режиме работы, облегченном режиме и ненагруженном режиме за период САС.

Если БКА разрабатывается и изготовляется по положению «РК*» (ракетно-космическая аппаратура), то тогда суммарная интенсивность отказов аппаратуры ($\Lambda_{\rm 3M}$) рассчитывается по формуле справочника [37]:

$$\Lambda_{\ni M} = K_a \cdot \Lambda_C, \tag{2.12}$$

где: Ка - коэффициент качества производства аппаратуры.

Коэффициент качества производства аппаратуры учитывает уровень требований к разработке и изготовлению аппаратуры (отработанность техпроцесса и уровень организации производства аппаратуры) и отражает среднестатистическую разницу в интенсивности отказов ЭРИ в аппаратуре, разрабатываемой и изготовляемой по требованиям различной НД. Для РЭА, разрабатываемой и изготовляемой по комплексу стандартов «Мороз-6», $K_a = 1$, а для РЭА, разрабатываемой и изготовляемой по положению «РК*», $K_a = 0.2$.

3. Рассчитываются показатели безотказности ЭМ1:

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda_{2M}} \tag{2.13}$$

$$P(t_3) = e^{-\Lambda_{3M} \cdot t_3} \tag{2.14}$$

Для автоматизации расчетов показателей безотказности ЭМ может использоваться система АСОНИКА-К-ЭМ программного комплекса АСОНИКА-К [40]. На рис. 2.8 приведен пример результатов расчета показателей безотказности в системе АСОНИКА-К-ЭМ.

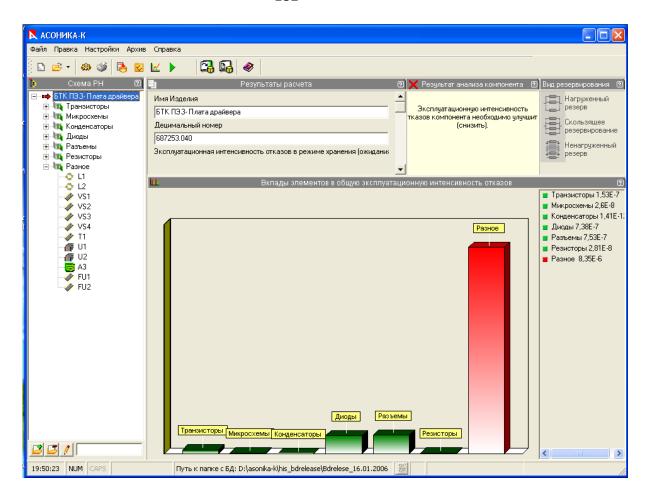


Рис. 2.8. Система ACOHИKA-K-ЭМ: Результаты расчета показателей безотказности электронного модуля

2.6.2 Методика расчета показателей долговечности электронных модулей БРЭА КА

Методика предназначена для проведения приближенного и уточненного расчета показателей долговечности электронных модулей.

Приближенный расчет проводится с целью уточнения предельно-допустимых коэффициентов нагрузки ЭРИ (по критичному параметру) аналитическим путем и формулирования требований ЧТЗ к составным частям на стадии эскизного или технического проекта.

Приближенный расчет проводится при отсутствии реальных значений коэффициентов нагрузки ЭРИ. Результаты приближенного расчета показателей безотказности входят в состав пояснительной записки по разработке аппаратуры.

При проведении приближенного расчета значения коэффициентов нагрузки ЭРИ определяются на основе данных, приведенных в [50] (см. таблицу 2.9).

Таблица 2.9. Рекомендуемы значения коэффициентов нагрузки ЭРИ

| Класс ЭРИ | | Значения Кн | | |
|-------------------|-------------------------|--|--------------|-------|
| | | | Максимальное | |
| | | Мини мально е | Режим | |
| | Критичный параметр | | К | |
| | | | ратков | Длите |
| | | | ременн | льный |
| | | | ый | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Диоды | Средний выпрямленный | 0,1 | 0,8 | 0,5 |
| полупроводниковые | ток | | | |
| полупроводниковые | Обратное напряжение | 0,1 | 0,8 | 0,5 |
| | Ток эмиттера | 0,1 | 0,8 | 0,5 |
| | Ток коллектора | 0,1 | 0,8 | 0,5 |
| | Мощность рассеивания на | 0,1 | 0,6 | 0,3 |
| Транзисторы | коллекторе | | | |
| | Обратное напряжение на | 0,1 | 0,8 | 0,5 |
| | переходах | | 0,0 | ,,,, |
| Интегральные | Рассеивая мощность | _ | 0,7 | 0,5 |
| схемы | T WOODING INOUTING | | 0,, | 0,5 |
| Резисторы | Рассеивая мощность | 0,1 | 0,7 | 0,5 |
| постоянные | T WOODING INOUTING | | | |
| Резисторы | Квадрат тока | 0,1 | 0,7 | 0,5 |
| переменные | темдрит токи | 0 ,1 | 0,7 | 0,2 |
| Конденсаторы | Напряжение | 0,3 | 0,7 | 0,5 |
| электролитические | | , ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,, | ,, | ,,,, |
| Конденсаторы | Напряжение | 0,1 | 0,7 | 0,5 |
| прочие | Timphicime | | ,· | |
| Электровакуумн | Рассеивая мощность | - | - | 0,7 |
| ые приборы | Анодное напряжение | | - | 0,8 |

| Силовые | Плотность тока | 0,1 | 0,9 | 0,8 |
|----------------|------------------------|-----|-------|-----|
| трансформаторы | | , | , | |
| Дроссели | Плотность тока | 0,1 | 0,9 | 0,9 |
| Коммутационны | Коммутируемый ток | * | 0,8** | _ |
| е изделия | Romary Impy Calbin Tok | | 0,0 | |
| Соединители | Ток | * | - | 0,8 |
| Реле | Реле Коммутируемый ток | | 0,8** | - |

Примечание:

* - минимальное значение коммутируемого тока определяется исполнением (защитой и материалом контактов);

** - при активной нагрузке.

Уточненный расчет показателей долговечности ЭМ1 проводится с целью определения аналитическим путем показателей долговечности с учетом реальных значений коэффициентов нагрузки ЭРИ, которые должны быть внесены в карты рабочих режимов (КРР), оценки их соответствия требованиям ТУ и ЧТЗ. Уточненный расчет показателей долговечности проводится на стадии разработки рабочей документации опытного образца и является составной частью отдельного документа РР01, входящего в состав КД.

Расчет показателей долговечности сводится к определению следующих основных показателей:

- T_γ гамма-процентный ресурс;
- Т_{Р.Ср} средний ресурс;
- Т_{МН} минимальная наработка (САС).

Расчет показателей долговечности ЭМ1, в соответствии с ОСТ 4.012.013 [17], проводится в следующей последовательности:

- 1. Формулируются критерий предельного состояния ЭМ.
- 2. По НТД (ГОСТы, ОСТы, ТУ) или по таблицам справочника [37] определяются значения показателей долговечности (T_{γ} , $T_{P.Cp}$, T_{MH}) ЭРИ.

Для ЭРИ, гамма-процентный ресурс которых задается в количествах циклов работы (срабатываний т.д.), перевод его в часы осуществляется по формуле:

$$T_{\gamma} = \frac{N_{\gamma}}{C} \tag{2.15}$$

где: N_{γ} - гамма-процентный ресурс; C - число циклов в час.

Если значения γ по Т3 на ЭМ и по НТД на ЭРИ не совпадают, то Т $_{\gamma}$ ЭРИ пересчитывают по формуле:

$$T_{\gamma} = \frac{(1 - 0.15 \cdot \chi_{\gamma})}{(1 - 0.15 \cdot \chi_{\gamma 1})} \cdot T_{\gamma 1} \tag{2.16}$$

где: χ_{γ} - квантиль нормального распределения для вероятности γ ; $\chi_{\gamma 1}$ - квантиль нормального распределения для вероятности γ_1 ; $T_{\gamma 1}$ - гамма-процентный ресурс ЭРИ по НТД.

Значения χ определяются по интегральной функции нормального распределения, график которой приведен на рис. 2.9.

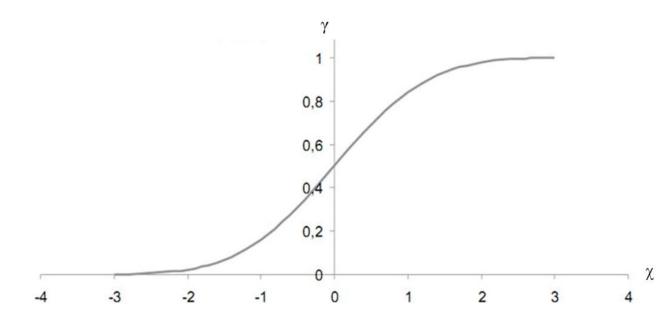


Рис. 2.9. Функция нормального распределения

3. Рассчитываются уточненные значения T_{γ} ЭРИ по формуле:

$$T_{\gamma} = \frac{T_{\gamma}}{K_H \cdot K_H} \,, \tag{2.17}$$

где: $K_{\rm H}$ - коэффициент использования ЭРИ при «сеансном» режиме работы БКА; $K_{\rm H}$ - коэффициент нагрузки ЭРИ (по критичному параметру).

Однако, как видно из табл. 2.9 одно и то же ЭРИ может иметь несколько «критичных параметров», в то время как в формуле (2.17) такой параметр должен быть только один. Разрешить эту проблему можно используя математические модели λ_9 , вычислив значение K_H по формуле:

$$K_H = \frac{\lambda_9(H.C.)}{\lambda_9},\tag{2.18}$$

где: λ_{3} - интенсивность отказов ЭРИ в режиме применения в ЭМ1; $\lambda_{3}(H.C.)$ - интенсивность отказов ЭРИ в предельно-допустимом режиме по ТУ («наихудший случай»).

Коэффициент использования рассчитывается по формуле РДВ 319.01.19 [52]:

$$K_H = \frac{t_{\Sigma pp}}{t_{\Sigma pp} + t_{\Sigma op}} \tag{2.19}$$

где: $t_{\Sigma pp}$, $t_{\Sigma op}$ - суммарные времена нахождения ЭРИ в режиме работы и режиме ожидания за период САС.

Однако формула (2.19) не совсем верна, т.к. не учитывает, того, что и в режиме ожидания БРЭА расходует свой ресурс. Более точным является выражение:

$$K_{H} = \frac{\lambda_{9} \cdot (\lambda_{C} - \lambda_{9.X})}{\lambda_{C} \cdot (\lambda_{9} - \lambda_{9.X})},$$
(2.20)

где: $\lambda_{3.}$ - интенсивность отказов в режиме работы; $\lambda_{3.X}$ - интенсивность отказов в режиме ожидания (хранения); $\lambda_{3.}$ - сеансная интенсивность отказов.

4. Рассчитываются показатели долговечности ЭМ.

Если критерий предельного состояния ЭМ формулируется как «израсходование 100% ресурса любым ЭРИ», что характерно для групп аппаратуры 5.2.-5.4 (см. табл. 2.1), то T_{γ} определяется как:

$$T_{\gamma} = \min\{T_{\gamma 1}, T_{\gamma 2}, ..., T_{\gamma i}, ..., T_{\gamma I}\}, \tag{2.21}$$

где: І - общее число ЭРИ в ЭМ.

Если критерий предельного состояния ЭМ1 формулируется как «израсходование ресурса не более чем X% ЭРИ» что допустимо группы аппаратуры 5.1 (см. табл. X.1), то расчет T_{γ} , в соответствии с ОСТ 4.012.013 [51], проводится в следующей последовательности:

1). ЭРИ группируются по временным интервалам, в зависимости от значения T_{γ} : 1-й интервал: от 0 до 1000 ч.

2-й интервал: от 1000 до 2000 ч.

. .

k-й интервал: от (k-1) · 1000 до k · 1000 ч.

. . .

К-й интервал: от (K-1) · 1000 до K · 1000 ч,

где: k = 1, 2, ..., K; K - число интервалов.

- 2). Определяется число ЭРИ, попавших в k-й интервал.
- 3). Вычисляется процент ЭРИ от их общего числа в ЭМ, попавших в k-й интервал, по формуле:

$$\%_k = \frac{i_k}{I} \cdot 100 \tag{5.22}$$

где: i_k - число ЭРИ, попавших в k-й интервал; I - общее число ЭРИ в ЭМ.

- 4). Вычисляется суммарный процент путем «последовательного» суммирования значений $%_k$ от K-того интервала к 1-му («снизу вверх»).
 - 5). По результатам расчетов заполняется таблица 2.10.

Таблица 2.10. Исходные данные для расчета показателей долговечности ЭМ1

| Τ _γ , ч. | Количеств | Процент от общего | Суммарный |
|---------------------|------------|-------------------|-----------------|
| | о ЭРИ, шт. | числа ЭРИ, % | процент, % |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| до 1000 | i_1 | % ₁ | Σ_1 |
| до 2000 | i_2 | % ₂ | Σ_2 |
| | | | |
| до k · 1000 | i_k | % _k | $\Sigma_{ m k}$ |
| | | | |
| до | i_{K} | % _K | $\Sigma_{ m K}$ |
| K·1000 | *K | /*K | - K |

6). Значение T_{γ} ЭМ1 определяется по максимальному значению столбца 1 таблицы 2.2, для которого выполняется условие:

$$\Sigma_k \ge (100 - X\%), \tag{X.23}$$

где: Х% - процент ЭРИ, заданный в критерии предельного состояния ЭМ.

Расчет $T_{P,Cp}$ ЭМ проводится аналогично расчету T_{γ} . Если значения T_{C} в НТД на ЭРИ не приведены, то его значения определяют по формуле:

$$T_{P.Cp} = \frac{T_{\gamma}}{1 - 0.15 \cdot \chi_{\gamma}},$$
 (X.24)

т.к. средний ресурс представляет собой случайную величину $(t_{P,Cp})$, которая распределена по нормальному закону (рис. 2.10) с математическим ожиданием $m=m(t_{P,Cp})$ = $T_{P,Cp}$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma=\sigma(t_{P,Cp})=0,15\cdot T_{P,Cp}$.

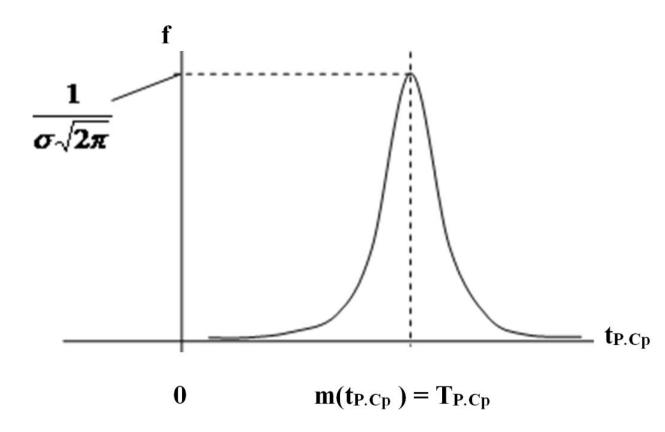


Рис. 2.10. Плотность вероятности нормального распределения

Расчет T_{MH} (CAC) ЭМ1 аналогичен расчету T_{γ} . Если значения T_{MH} в НТД на ЭРИ не приведены, то ее значения определяют по формуле (2.16) для γ = 99,9%.

В заключении следует отметить, что приведенные в настоящем разделе методы оценки надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов естественно не охватывают весь спектр задач расчетной оценки надежности, решаемых при проектировании БРЭА.

Однако, характеристики надежности ЭРИ и показатели надежности ЭМ1 являются исходными данными для расчетов надежности структурно-сложной (резервированной, реконфигурируемой и др.) БРЭА, а, следовательно, в значительной степени определяет точность и достоверность таких расчетов.

2.7 Выводы по главе

Проведен анализ методов оценки надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (БРЭА КА) и возможность их применения с учетом особенностей схем расчета надежности БРЭА КА. Разработаны методы расчета электронных модулей БРЭА КА, позволяющие учитывать влияние ЭСР на их надежность. Разработаны методы имитационного моделирования БРЭА КА, позволяющие оценить показатели надежности структурно-сложной БРЭА и БРЭА с реконфигурируемой структурой, позволяющие в совокупности повысить точность и достоверность расчетной оценки надежности БРЭА КА.

3 Исследование и разработка методов и средств компьютерного моделирования процесса растекания токов по корпусу космического аппарата

В результате дифференциального заряжения элементов поверхности космического аппарата и объемного заряжения полимерных диэлектриков его внешней поверхности возникают поверхностные и объемные электростатические разряды, которые вызывают обратимые и необратимые отказы бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Электризация космического аппарата и те негативные процессы, которые она порождает, безусловно, являются существенным препятствием для активного функционирования космических аппаратов в течение 10 -15 лет. Эти причины еще в большей мере распространяются на дорогостоящие КА индивидуального назначения, учитывая исключительную насыщенность их радиоэлектронной и оптико-электронной аппаратурой (например, КА «Спектр-Р», созданный ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»).

3.1 Электризация бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов

Космические аппараты на геостационарной орбите и на высокоэллиптических орбитах работают в разреженной плазме. Концентрация ионов и электронов в плазме составляет всего несколько штук в кубическом сантиметре. Однако этого оказывается достаточно для того чтобы сам космический аппарат зарядился до отрицательного потенциала 20 киловольт в условиях наихудшего случая. Элементы конструкции космического аппарата изготовлены из материалов имеющих различные электрофизические характеристики и поэтому заряжаются до различных потенциалов. Этот процесс называют дифференциальным заряжением. Разность потенциалов между элементами конструкции ИЗ различных материалов В результате такого дифференциального заряжения достигает 10 кВ. Это приводит к возникновению электростатических разрядов на поверхности космического аппарата. Передний фронт таких разрядов составляет 3-5 наносекунд при амплитуде разрядного импульса до 100 ампер. В результате по конструкции космического аппарата протекают импульсные токи, которые наводят в кабелях, проложенных по внешней поверхности, импульсные помехи в единицы и десятки вольт. Эти помехи вызывают сбои в работе бортовой радиоэлектронной аппаратуры, а также необратимые отказы электронных систем.

Статистика отказов показывает, что в 30% случаев причиной отказов в работе космических аппаратов Земли является электризация. Попытки полного исключения возможности возникновения разрядов путем подбора материалов внешней поверхности космических аппаратов пока безуспешны. Удается лишь снизить частоту и мощность разрядов, но не исключить их полностью.

3.1.1 Общие проблемы электризации КА.

В настоящее время развитие космической техники отечественного производства идёт по линии создания целевых группировок, важнейшим критерием эффективности которых является обеспечение длительных сроков эксплуатации входящих в них отдельных космических аппаратов (КА). В соответствии с этим обстоятельством Федеральным космическим агентством к КБ отрасли, создающим телекоммуникационные, метеонавигационные, патрульно-дежурные, для нужд разведки и другие важные космические системы, предъявляются требования о доведении сроков активного существования создаваемых КА в ближайшее время до 10–15 лет и более.

Указанные требования, безусловно, распространяются и на дорогостоящие КА индивидуального назначения, учитывая исключительную насыщенность их радиоэлектронной и оптико-электронной аппаратурой новейших разработок (например, КА «Спектр-Р», созданный ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»).

Электризация КА, работающих на геостационарной орбите и высокоэллиптических орбитах, привела к сбоям в работе и отказам систем КА еще в конце 60-х годов прошлого столетия. В это время многие исследователи начали работать над проблемой электризации КА с целью минимизации ее негативных последствий.

Было установлено, что в магнитосфере Земли на ночной стороне КА приобретает отрицательный потенциал порядка единиц киловольт при геомагнитных возмущениях (суббурях), вызванных вспышками на Солнце.

К основным факторам, приводящим к электризации, следует отнести потоки электронов и ионов околоземной космической плазмы, жесткое ультрафиолетовое излучение Солнца, вакуум, термоциклирование. Воздействие перечисленных факторов на материалы внешней поверхности космического аппарата вызывает обильную вторичную электронную эмиссию и фотоэмиссию, температурное изменение электрофизических параметров материалов. Все перечисленное особенно существенно для высокоорбитальных космических аппаратов во время суббурь в магнитосфере Земли. В результате происходит общее и дифференциальное заряжение поверхности космического

аппарата. Общее заряжение космического аппарата как единого целого не представляет особой опасности для функционирования электроники космического аппарата. Можно лишь отметить некоторые проблемы со спектрометрами частиц и подобной аппаратурой.

Совсем иначе обстоит дело с дифференциальным заряжением элементов поверхности космического аппарата и объемным заряжением полимерных диэлектриков его внешней поверхности. В результате такого заряжения возникают поверхностные и объемные электростатические разряды, которые вызывают обратимые и необратимые отказы бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Такое сильное воздействие разрядов на работу бортовой электроники обусловлено как параметрами разрядных импульсов, так и повышенной чувствительностью бортовой электроники к данным воздействиям. Развитие космической техники предполагает применение элементной базы, обладающей повышенной степенью интеграции микросхем, большими функциональными возможностями, пониженным энергопотреблением, снижением массогабаритных параметров. Однако в той же степени растет чувствительность элементной базы электроники к воздействию электростатических разрядов.

Источниками помех для бортовой электроники служат электростатические разряды, а основными рецепторами помех являются фрагменты бортовой кабельной сети, проложенные по внешней поверхности космических аппаратов.

Для повышения стойкости космических аппаратов к факторам электризации необходимо снижать частоту и мощность электростатических разрядов на поверхности космического аппарата путем применения материалов, обладающих пониженной электризуемостью. Поскольку полностью исключить электростатические разряды не удается необходимо проводить расчеты наводок в бортовой кабельной сети. В этом случае в технических заданиях на разработку электронных блоков будут заложены величины помеховых сигналов, при которых эти электронные блоки должны сохранять свою работоспособность. Таким образом, изначально, при разработке БРЭА КА должно закладываться условие работоспособности этой аппаратуры в условиях повышенного уровня помех от ЭСР.

Формирования потенциального рельефа на поверхности КА, распределение электрического поля в окрестности аппарата, образование седловидных точек в его распределении и их влияние на заряжение как неосвещенных, так и освещенных участков поверхностей, включая вопросы численного расчета потенциального рельефа и его изменения во времени, подробно рассмотрены в литературе [53-58].

Заряжение элементов КА в космической плазме происходит по причине значительного превышения электронного диффузионного тока над ионным током. Величина плотности электронного тока в условиях наихудшего случая достигает 10^{-9} А/см². При такой плотности тока время электризации КА, имеющего типичные размеры шара с радиусом 2 м, до потенциала 10 кВ составляет всего 5 мс. Таким образом, общая зарядка КА происходит практически мгновенно.

Дифференциальная зарядка заканчивается за значительно большие времена, так как емкость единицы площади диэлектрического покрытия при толщине $100{\text -}300$ мкм относительно корпуса достаточно велика ~ 10 пФ/см². Время, необходимое для достижения потенциала поверхности диэлектрика относительно корпуса 10 кВ, в этом случае, превысит 1000 с.

Солнечная засветка приводит к полному разряжению металлических поверхностей, однако в диэлектрических материалах остаются объемные заряды. Часто именно этот аспект электризации приводит к возникновению электростатических разрядов.

Согласно [59] мощность дозы высокоэнергетичных частиц на геостационарной орбите (ГСО) составляет в среднем $0{,}003$ Гр/с. Если электропроводность диэлектрика внешней поверхности КА не превышает 10^{-16} Ом $^{-1}$ см $^{-1}$, то напряженность внутреннего электрического поля в диэлектрике окажется выше 10^6 В/см и электрический пробой станет вполне вероятным [60].

Поскольку большинство диэлектриков (полиимид, политетрафторэтилен, полистирол и т.д.) являются дырочными диэлектриками, подвижность электронов в них гораздо меньше подвижности дырок. И только в ПЭТФ и стекле возможна электронная проводимость. Для таких материалов можно, в принципе, говорить об инжекционных токах [61], которые позволяют зарядам стекать из диэлектрика на металлические элементы конструкции КА.

В настоящее время проблема электризации внешней поверхности КА до конца не решена. До сих пор используются непроводящие клеи для соединения между собой достаточно проводящих элементов. Часто проводящие покрытия наносятся на диэлектрические материалы, но контроль металлизации этих покрытий недостаточен для прогнозирования долговременной эксплуатации этих соединений без нарушения металлизации. До сих пор в руководящих документах имеется разрешение на использование элементов экранно-вакуумной теплоизоляции площадью до 0,2 м² без металлизации. Углепластиковые конструкции изготавливают по устаревшей технологии, оставляя на поверхности изделий непроводящие наплывы эпоксидной или полиэфирной

смолы. Внедрение новых материалов и запрет на использование материалов непригодных с точки зрения электризумости наталкиваются на бюрократические препоны.

Вместе с тем, на смену внешней электризации пришла электризация внутренняя. Это в значительной степени обусловлено новым подходом к изготовлению КА без гермоконтейнеров для бортовой аппаратуры и с разрешением использования в составе КА элементной базы в пластмассовых корпусах. Не решив до конца первую проблему, мы всерьез столкнулись со второй. Рассмотрим основные факторы внутренней электризации и основные задачи сегодняшнего дня по устранению ее негативных последствий.

На рис. 3.1 приведена довольно удачная схема основных механизмов внутренней электризации, заимствованная из [62].

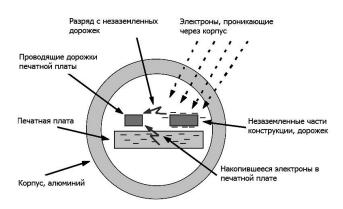


Рис. 3.1 Основные механизмы внутренней электризации [62].

Из приведенной схемы видно, что электроны околоземной космической плазы могут проникать сквозь корпус КА и накапливаться в диэлектрическом материале печатной платы. При таком заряжении диэлектрика печатной платы возможны электростатические разряды непосредственно в токоведущие дорожки этой платы. Это непосредственная угроза активным элементам, распаянным к этим дорожкам. Фактически в руководстве НАСА [62] 2011 года систематизированы основные аспекты нашей работы [63] опубликованной в 2003 году.

Для более тонкого понимания явления внутренней электризации КА рассмотрим вопрос космической «погоды» и связанные с этим термином потоки высокоэнергетических электронов способных проникнуть внутрь корпуса КА и привести к заряжению диэлектрических материалов электронных схем.

3.1.2 Влияние околоземной космической «погоды» на электризацию КА

Фундаментальное значение в преодолении негативных факторов электризации имеют исследования, посвящённые выяснению особенностей космической «погоды», а именно параметрам воздействия потоков электронов в районах радиационных поясов Земли. Наибольшую угрозу ДЛЯ функционирования бортовой аппаратуры представляет радиация, которая сосредоточена в околоземном космическом пространстве в области радиусом около 65 тысяч км, удерживаемая магнитным полем Земли. Данную геомагнитную ловушку для заряженных частиц космического излучения называют радиационным поясом (или поясами) Земли. Электроны с энергией 100 кэВ и больше образуют в геомагнитной ловушке две зоны. Эти зоны получили название внутреннего и внешнего естественного радиационного пояса Земли (ЕРПЗ) [64]. Между внутренним и внешним поясами наблюдается зазор или провал в интенсивности потока электронов. Внутренний пояс располагается на высоте от 1000 км над поверхностью Земли до 13 000 км. Выше 13000 км и примерно до 65000 км располагается внешний радиационный пояс Земли с максимумом потока электронов (E > 40 кэB) порядка $500\ 000\ 000\ 4$ частиц/см 2 с на высоте около 16500 км. Радиационные пояса представляют собой непрерывно изменяющуюся, динамичную систему, состояние которой зависит от состояния солнечной активности и процессов, которые реализуются в настоящий момент в магнитосфере Земли [64-66]. Экспериментальные данные указывают на то, что увеличение скорости солнечного ветра приводит к увеличению потока высокоэнергичных электронов на границе магнитосферы и усиливается диффузия этих электронов внутрь радиационных поясов. Известно также, что во внешней магнитосфере интенсивность потоков электронов и протонов может изменяться в течение нескольких дней на несколько порядков [64]. Связь интенсивности потоков электронов с солнечным ветром даёт возможность предсказывать изменения космической «погоды», заранее прогнозировать «условия наихудшего случая» для функционирования БРЭА, так как солнечная циклический, повторяющийся активность, провоцирующая эти изменения, имеет характер.

Цикличность возрастания скорости солнечного ветра связана, в свою очередь со следующими обстоятельствами. Известно, что Солнце вращается вокруг своей оси таким образом, что в области экватора оно вращается быстрее (период вращения около 25 суток), а на полюсах медленнее (период вращения около 33 суток) [65]. Анализ данных со

спутника «Радуга» (1977-1978) показал, что во временных рядах данных интенсивности потоков релятивистских электронов содержится две основные гармоники. Одна гармоника имеет период около 27 суток, другая около 31 суток. Аналогичный анализ данных интенсивности потока электронов с энергией более 2 МэВ за период с 1986 г. по 1995 г. с КА «GOES» также позволил обнаружить две гармоники, но уже с периодами 26 и 30 суток. Наличие этих двух гармоник предполагает существование двух областей на Солнце, активность в которых определяет радиационные условия в околоземном пространстве. Первая область располагается вблизи экватора и совпадает с областью, где обычно наблюдается формирование солнечных пятен. Вторая область располагается в высоких широтах и совпадает с областью коронарных дыр на Солнце [65]. Таким образом, можно с достаточной достоверностью предсказывать ритмические перепады в плотности потоков электронов, особенно если учитывать ещё и суточные вариации.

Для этой цели широко применяются полуэмпирические модели потоков электронов, разработанные NASA (AE8 min, AE8 max) и НИИЯФ МГУ. На их основе созданы различные программные пакеты, такие как SPENVIS (EKA), COSRAD (НИИЯФ МГУ), RADMODLS (NASA) и др., применение которых для расчета потоков электронов за определенной массовой защитой в эквиваленте алюминия на нескольких вариантах орбит описано в работах [67-69].

Таким образом, воздействие внешней космической среды на функционирование КА связано с активностью радиационных поясов Земли, излучений генерируемых солнцем и галактическим космическим излучением. Естественно, что изучение космической «погоды» было и остаётся важнейшим направлением исследований, способствующих нейтрализации негативных последствий действия различного рода излучений в космосе на работу КА. Это касается как определения количественных характеристик, например, интенсивности потока электронов, так и выявления механизмов усиления излучений разного рода в околоземном пространстве.

3.1.3 Внутренняя электризация космических аппаратов.

В отечественной науке изучение воздействия космического излучения на материалы и электронное оборудование космических аппаратов было начато в начале 60-х годов XX века. Если быть совсем точным, то начало подобных исследований датируется концом 1961 года. Они были организованы в НИИЯФ МГУ в Лаборатории ядерных реакций по просьбе С.П.Королёва. С.П.Королёв обратился к директору указанного института, академику С.Н. Вернову с просьбой выявить наиболее стойкие к воздействию

космической радиации материалы для терморегулирующих покрытий. С течением времени задачи исследователей значительно расширились, и основной темой их работ стало изучение электризации КА. В 1965 в НИИЯФ была создана Лаборатория космического материаловедения (ЛКМ) под руководством А.И.Акишина.

Исследования в ЛКМ осуществлялись по следующим направлениям: разработка научно обоснованных методов имитации воздействия космических корпускулярных излучений на материалы и элементы оборудования КА и исследование их радиационной стойкости; разработка методов имитации воздействия на материалы ионосферной плазмы и проведение соответствующих испытаний; исследование процессов формирования собственной внешней атмосферы её воздействия на материалы и элементы оборудования, находящиеся на внешней поверхности аппарата; разработка методов имитации потоков космической пыли и изучение воздействия таких потоков на материалы [69]. Как следует из формулировок основных направлений исследований ЛКМ значительное место в них уделено проблемам электризации оборудования КА, то есть внутренней электризации. Первые результаты изучения проблем воздействия космического излучения были отражены в публикациях того времени [70] В обобщенной форме итоги первого этапа изучения воздействия космического излучения на элементы КА подведены в докладе А.И.Акишина [71].

В числе первых отечественных публикаций, посвящённых электростатическим разрядам в объеме некристаллических диэлектриков, была и статья сотрудников Томского политехнического университета. В 1976 году был предложен критерий оценки плотности тока заряженных частиц, при которой возможна потеря электрической прочности среды, вследствие её радиационной электризации [72]. По расчётам В.А.Стародубцева для многих диэлектрических материалов значение критической плотности тока лежит в интервале 0, 1 – 1 нА см² [73].

С начала 80 годов в связи с использованием спутников на геостационарной орбите обнаружились совершенно новые типы отказов электронной техники и аномалий в работе аппаратуры на борту КА. Это потребовало интенсификации исследований воздействия космического излучения на элементы оборудования космических кораблей. Были разработаны новые методы исследований, а также была создана физико-математическая модель электризации. Эта работа была осуществлена под руководством Л.С. Новикова и В.Н. Милеева. Существенное развитие получили методы имитации воздействия космического излучения в экспериментальных условиях. Результаты работы по совершенствованию методов изучения и соответствующей аппаратуры обобщены в ряде

публикаций [74-76]. Электризация диэлектрических материалов КА может вызываться также электронами радиационного пояса Земли с характерными энергиями 1-10 МэВ. Электроны с такими энергиями проникают в диэлектрик на глубины до 1 см, создавая внедрённый электрический заряд. Это явление называется объёмной электризацией КА, в отличие от случаев поверхностной электризации, обусловленной воздействием на КА магнитосферной плазмы, частицы которой могут проникнуть в диэлектрик на глубину 10-20 мкм [69]. В результате длительных и многочисленных лабораторных экспериментов, выполненных А.И.Акишиным с сотрудниками, стало возможным установить основные закономерности явления объёмной электризации, провести классификацию наиболее часто используемых в конструкции КА диэлектрических материалов по уровню накопления объемного заряда, предложить методы предотвращения объемной электризации и вызываемой ею электрических разрядов [69]. Были вычислены также пороговые значения флюенса электронов, соответствующих началу возникновения электрических разрядов. Интересно, что в лабораторных экспериментах пороговые значения составили 10^{13} - 10^{14} см⁻², в то время как в космических условиях данный порог составил 10^{10} - 10^{11} см $^{-2}$.

Исследования электризации космических аппаратов, первоначально осуществляемые в НИИЯФ и на физическом факультете МГУ, впоследствии распространились и на другие исследовательские организации и учреждения. Важную роль в этом сыграла организация в МИЭМ соответствующих специализаций ещё в 1971 году, а затем и кафедры «Материалы электронной техники». Весьма полезным было издание коллективом авторов руководства для конструкторов [77].

Начало достаточно массовому исследованию проблемы внутренней и внешней электризации КА в США было положено в конце 70-начале 80 г.г. ХХ века. А. Фредериксону принадлежит, видимо, наиболее ранняя работа, посвящённая воздействию радиационного излучения на диэлектрики, которая была опубликована ещё в 1974 году [78]. Впоследствии, в 70-80 г.г. ХХ века А. Фредериксон продолжил разработку проблемы воздействия различных видов излучения на диэлектрики, в частности в 1983 году он публикует статью [79]. Наиболее значимым исследованием А. Фредериксона было участие в изучении проблемы спонтанного разряда различных диэлектриков под воздействием космической радиации. Это получило отражение в коллективном исследовании [80] и итоговой статье [81]. Последняя работа представляет наибольший интерес, так как там представлены данные об электризации и диэлектрическом разряде 16-ти образцов материалов, используемых в космической промышленности. Среди них

текстолит, стеклотекстолит, тефлон, каптон и другие. В некоторых аспектах данное исследования есть продолжение анализа этой же проблемы в статье, написанной коллективом авторов и опубликованной на год раньше. Обе работы основаны на результатах натурных экспериментов на специальном спутнике CRRES [82], но более поздняя работа [81], опубликованная в 1992 году, содержит более подробный анализ воздействия космического излучения на различные образцы диэлектриков и включает результаты предыдущей работы. Обратимся к содержанию этого исследования.

Шестнадцать образцов материалов космической техники были подвержены воздействию излучений радиационных поясов Земли в течение 14 месяцев. Спонтанные разряды были зафиксированы в каждом образце и сравнивались с уровнями радиации. которые фиксировались одновременно с ними. В образцах с не металлизированной поверхностью разрядные импульсы наблюдались наиболее часто. Амплитуда большинства зарегистрированных импульсов была менее 50 вольт на резисторе 50 Ом. Была отмечена слабая корреляция частоты возникновения импульсов с величиной потока электронов, и не было обнаружено никакой корреляции с величиной потока протонов [81]. Исследование было выполнено при помощи специальной аппаратуры, обеспечивала фиксацию внутренних разрядов (Internal Discharge Monitor – IDM), размещённой спутнике CRRES. Реальными объектами исследования были уменьшенные копии кабелей и электронных плат различной формы. Всего было зарегистрировано 4300 разрядных импульсов на 16 образцах в течение 14 месяцев. На указанном спутнике находились различные спектрометры, способные космическое излучение, включающее электроны от 1 эВ до 10 МэВ. Энергия максимально интенсивных потоков электронов лежала в диапазоне между 200 и 400 кэВ. Детально описаны образцы различных диэлектриков, их количественные параметры. Анализируя итоговую таблицу частоты разрядов в различных образцах, можно убедиться в справедливости вывода о том, что более подвержены разрядам чисто диэлектрические образцы с не металлизированной поверхностью. Различия в количестве разрядов огромны. Часть образцов практически вообще не была подвержена электрическим разрядами, в то время как некоторые образцы, например, FR 4 (стеклотекстолит) испытал более 1,5 тысяч (!) разрядов различной мощности. Авторы цитируемой работы демонстрируют связь количества разрядов с формой (геометрией) исследуемых объектов и материалом из которых они изготовлены. Наименее подвержены разрядам, согласно полученным данным образцы, выполненные из каптона. Наихудшим материалом для КА, по мнению авторов исследования, является стеклотекстолит и его модификации.

В статье обозначены количественные параметры «безопасного» флюенса электронов, который не нанесет существенного вреда аппаратуре КА. По этим данным, он составляет $5.5 \cdot 10^5$ электронов на см 2 для десятичасового полета. Подводя итог исследованию, авторы делают вывод о том, что спонтанные диэлектрические разряды возможны, если плотность потока электронов на поверхности диэлектрика превышает $5 + A/cm^2$. Кроме того не было обнаружено связи между электростатическими разрядами и потоками протонов.

В рассматриваемом исследовании были поставлены основные проблемы, касающиеся внутренней электризации, и проанализированы основные понятия, посредством которых изучаются электростатические разряды в КА. В нём была показана существенная роль таких понятий как «безопасный» поток электронов и порог безопасности для функционирования бортовых приборов. В последующих исследованиях изучение проблемы внутренней электризации приобретали новые формулировки, основные положения уточнялись, количественные данные проверялись для более длительных периодов наблюдения, но все же анализ данного вопроса шёл в русле основных понятий, выделенных А. Фредериксоном и его коллегами.

Изучение проблем внутренней электризации в XXI веке стало ещё более актуальным ввиду конструктивных изменений в отечественных космических аппаратах, которые теперь лишены герметичного термостатируемого контейнера, представлявшего собой существенный барьер для космических излучений.

Современные исследования внутренней электризации КА не обладают такой степенью интеграции и координации, которая имело место в 70-80 гг. и даже в начале 90 гг. XX века. Но, тем не менее, в нашей стране продолжаются работы по увеличению сроков активного существования спутников. Важнейшим направлением этих работ является нейтрализация нежелательных эффектов внутренней электризации элементов бортового электронного оборудования. По некоторым оценкам, от 40% до 50 % всех обусловленных ФКП неполадок на современных космических аппаратах связаны с действием статического электричества. Электростатические разряды, вызывают сбои и отказы в работе бортовой аппаратуры, постепенную деградацию свойств диэлектрических материалов и покрытий КА, и даже способны привести к полной его потере» [83].

В последние годы именно феномен внутренней электризации становится всё более востребованным предметом исследований, как в нашей стране, так и за рубежом. По мнению авторов работы [83], акцент в исследованиях сместился с поверхностной на внутреннюю электризацию, особенно критичную для элементной базы электронной

аппаратуры. Электрический заряд накапливается в диэлектриках электронных схем, за счёт проникающих извне корпускулярных излучений, прежде всего электронов с энергией в несколько МэВ. В результате возможно возникновения ЭСР в непосредственной близости от электронных схем КА [83]. Именно внутренняя электризация признана причиной потери многочисленных спутников связи США.

Авторы рассматриваемой работы настаивают на разностороннем изучении проблемы внутренней электризации и практическом применении различных способов нейтрализации её нежелательных эффектов. Так, они отмечают продуктивность использования активной защиты от потока электронов, установленной на МКС. Активная антистатическая защита состоит в использовании генераторов низкотемпературной плазмы, с помощью которых удаётся удерживать потенциал КА относительно космической плазмы в приемлемых пределах [83]. Дальнейшая разработка активной защиты представляется перспективным направлением исследований. Не менее, а может более важно совершенствование пассивной защиты, а именно разработка новых диэлектрических материалов. Возможности данного направления ещё далеко не исчерпаны и здесь могут быть достигнуты позитивные результаты.

Среди них важное место занимает совершенствование методов определения параметров поражающих факторов и степени электризации. В это направление входит экспериментальное тестирование влияния электронных потоков на Земле и реальное измерение плотности потоков и степени внутренней электризации в космосе. Здесь важнейшей задачей является нахождение безопасного потока, то есть порога безопасности для работы аппаратуры КА. Анализ данных в течение длительного периода времени (иногда более 20 лет), полученных при помощи специальной аппаратуры, установленной на спутниках — важнейшее направление исследований, а затем и преодоления нежелательных эффектов внутренней электризации.

Важную роль в аккумуляции знаний о внешней и внутренней электризации КА и их распространении среди проектировщиков и специалистов-инженеров призваны сыграть специальные руководства НАСА, посвящённые указанным проблемам. Они содержат в себе информацию,

(NASA HDBK4002, 1999 and NASA HDBK4002A, 2011) [83] характеризующую процессы электризации и электростатических разрядов и комплекс возможных мер, направленных на нейтрализации нежелательных последствий внешней и внутренней электризации КА.

Руководство НАСА позволяет унифицировать данные, полученные учёными и сориентировать исследователя или проектировщика в широком диапазоне возможных способов преодоления последствий электризации. Так в руководстве НАСА от 2011 года в начале даются определения основных понятий [62], затем рассматриваются процесс и факторы внутренней электризации, после этого анализируются количественные данные о функционировании приборов в условиях внутренней электризации. В разделе 4.1.2 руководства приводятся довольно подробные характеристики различных видов излучения, проникающего во внутреннее пространство КА. Завершает руководство рассмотрение факторов, способствующих внутренней электризации - обобщающая схема, в которой отражены все объекты внутри космического корабля, подверженные электризации (электрические сети и схемы, электронные платы).

Существенное значение для изучения внутренней электризации и практического применения имеют также основные понятия, характеризующие данный процесс. Это диэлектрическая проницаемость материалов, их темновая электропроводность, электрическая прочность и время релаксации заряда [62].

Большое значение уделяется описанию ряда явлений, сопутствующих процессам внутренней электризации И ИХ определению. Например, оиткноп субштром (электронный) или суббуря посвящён специальный раздел, также как и явлению объемного разряда в диэлектрике. Кроме описания физических процессов и их количественных параметров руководство содержит рекомендации по использованию/не использованию тех или иных материалов при создании КА. В нём содержится список пригодных материалов для создания КА с их характеристика и список материалов не рекомендуемых для применения в космической промышленности. Есть в руководстве и данные об относительно безопасных с точки зрения внутренней электризации условиях полёта КА, например, параметры «безопасного» потока электронов.

Наряду с созданием руководств, способствующих более эффективной эксплуатации КА, в США были осуществлены многочисленные исследования, посвящённые внутренней электризации КА. Остановимся на анализе содержания некоторых из них.

В настоящее время основные исследования посвящены изучению воздействия электронов на внутреннюю электризацию КА, выявлению оптимальных свойств и параметров диэлектриков, используемых в космической промышленности. Так коллектив авторов, среди которых был А. Фредериксон изучала удельное сопротивление диэлектриков, используемых в печатных платах электронных приборов [85]. В этой

достаточно подробно показаны трудности, с работе которыми сталкиваются исследователи при измерении той или иной характеристики материалов. Н. Грин и его коллеги измерили исходное удельное сопротивление материалов и отметили, что данная величина может изменяться при эксплуатации материалов в космосе и отличаться от стандартных показателей, полученных в результате экспериментов. Они полагают, что данный вопрос имеет фундаментальное значение и нуждается в дальнейшем исследовании. В определенной степени изменение удельного сопротивление проливает свет на загадку двух значений временной постоянной, о которой речь шла ещё в статье Фредериксона 1992 года. Но всё же, с чем связаны, в конечном счёте, различные показатели постоянной времени релаксации заряда пока не ясно. Определенно можно сказать одно – результаты измерений в эксперименте на Земле и в космосе не всегда совпадают. Поэтому вывод статьи о том, что сопротивление этих материалов может изменяться и изменяться существенно в соответствии с воздействием космического излучения [85] достоверен и подтверждается выводами других исследователей. Изменения, происходящие с удельным сопротивлением и соответственно с постоянной времени релаксации заряда, их характер и возможные причины существенны для рекомендации использования того или иного материала для длительных полётов в космосе. Вполне возможно, что физические свойства материалов могут изменяться со временем в результате комплексного воздействия в космосе всех факторов. Вопросы, связанные с различными количественными характеристиками временной постоянной рассматриваются и в последующем изложении при анализе работы М.Бодэ [86].

Испытания в условиях реального космоса нередко приносят неожиданные результаты. Так, например, величина потенциалов на экранно-вакуумной тепловой изоляции с покровной тканью из астрокварца (кварцевая ткань, образованная переплетением большого количества нитей) не согласовывалась с результатами полученными перед полётом в условиях эксперимента (данные со спутника SCATHA). Если лабораторные наземные испытания показали, что кварцевые ткани заряжались до максимального потенциала равного нескольким сотням вольт, то результаты полётных испытаний привели к величинам потенциалов порядка 1600 - 3500.вольт.

Наиболее полно, всесторонне и обобщенно натурные исследования влияния высокоэнергетических электронов на процессы внутренней электризации проанализированы в работе М.Бодэ [86]. На сегодняшний день это наиболее новое и достаточно информативное исследование проблем, связанных с внутренней электризацией. В своей работе М. Бодэ стремится свести воедино различные аспекты

проблемы внутренней электризации: определение «безопасного» потока электронов, «наихудшие условия» для полётов КА, существенное различие количественных величин некоторых параметров диэлектриков в экспериментальных и «натурных» условиях. Высокая степень электризации диэлектриков внутри корпуса космического аппарата рассматривается в данной статье в качестве основной причины неисправностей на спутниках. Спутник на геостационарной орбите за 10 часов полёта дважды проходит через районы интенсивных электронных потоков в радиационных поясах Земли. Автор полагают, что интенсивные потоки излучений являются важнейшей причиной выхода их строя аппаратуры КА в результате электростатических разрядов. Согласно его исследованиям, существуют явная корреляция между плотностью электронов в потоке и количеством электростатических разрядов. В процессе анализа М.Бодэ пытается доказать правильность и надёжность одного из наиболее используемых рекомендаций руководства HACA - положение о «безопасном потоке», то есть о параметрах электронного потока, ниже которого возможна безопасная эксплуатация космических аппаратов. Уровень безопасного потока был определён в 100 фА/см² [86]. При таком и ниже уровне внешнего потока нет риска внутренней электризации, и данные показатели могут считаться критерием безопасности для работы космических аппаратов. В последующем изложении автор приводят данные о выходе из строя КА, анализирует причины выхода из строя КА, а также рассматривает факторы, способствующие чрезмерной электризации и меры по нейтрализации этого деструктивного явления. В рассматриваемой статье приводятся многочисленные случаи неисправностей и отказов в работе оборудования, вызванных внутренней электризацией в результате воздействия повышенных потоков электронов (всего их анализируется 26). В работе [86] отмечается, что для восполнения пробелов в экспериментальных данных необходимы были длительные экспериментальные исследования. Они были осуществлены с целью установления параметров «безопасного потока» при помощи специального спутника (CRRES), на котором была установлена специальная аппаратура, осуществлявшая контроль за внутренними разрядами (IDM). Платы и кабели, используемые в эксперименте, имели уменьшенные размеры, но были сделаны из тех же материалов, что используются в реальности. Экранирование этих образцов было обеспечено слоем алюминия толщиной всего 0,2 мм. Было выдвинуто предположение, порог безопасности для десятичасового полета составляет величину менее $2 \cdot 10^{10}$ электрон/см². Действительно во время десятичасового экспериментального полёта спутника со специальной аппаратурой было выявлено следующее. $2 \cdot 10^{10}$ электрон/см² (что эквивалентно полета вне зоны потока электронов выше

непосредственной плотности 90 фА/см²) не возникало разрядов. Но дело в том, что спутники летают по 10 лет и больше и за это время воздействие электронных потоков может оказывать иное воздействие, нежели во время десятичасового полёта и поток безопасный для десятичасовой экспозиции не будет таковым для более длительных полётов.

Для выяснения условий более надежной работы аппаратуры, НАСА собрала данные об электризации материалов, используемых в КА. В процессе анализа данных выяснилось, что ключевым параметром определяющим накопление зарядов является объёмное удельное сопротивление и связанное с ним время релаксации заряда, которое является произведением объёмного удельного сопротивления и диэлектрической постоянной. Данные, собранные НАСА для основных материалов, используемых при создании КА, показывают, что время релаксации заряда варьируется от нескольких минут до 3 часов в процессе десятичасового воздействия «наихудших условий». На основании достигнутых результатов планировались долгосрочные полёты. Таким образом, постоянная времени релаксации заряда может иметь определяющее значение для выбора материала для конструирования КА. Но, как показали исследования А.Фридерексона и его коллег ещё в 1992 году, данный параметр может изменяться с течением времени. Другими словами количественные показатели времени релаксации заряда могут быть различными в разные периоды полёта.

М. Боде, также получил данные отличные от тех, которые приводятся в руководстве НАСА выпуска 1999 года. Эти данные остались без изменения и в руководстве НАСА 2011. Итак, М. Бодэ используя результаты измерений потенциалов диэлектриков бесконтактным методом, на спутнике CRRES получил количественные показатели. Постоянная времени для оксида алюминия составила 21 час, 5 дней для FR4 и 339 дней для тефлона, в то время как в руководстве HACA приведены значения 0,8 сек, 2,1 часа и 2,1 дня соответственно [86]. Это показывает, что объёмное удельное сопротивление диэлектриков выдержанных длительное время в вакууме значительно выше, чем в наземных экспериментальных измерениях. В процессе анализа проблемы «безопасного потока электронов», выяснения оптимальных условий работы аппаратуры и правильного подбора материалов, автор детально анализирует данные со специальных спутников, полученные за 20 лет наблюдений. В частности он отмечает недостаточность 2,6 мм (Al) защиты для материалов с очень большой временной постоянной релаксации (более 3 недель).

Итоги исследования М.Бодэ состоит в утверждении безопасных границ эксплуатации электронного оборудования на КА. Это напряжённость электрического поля порядка 100-200 кВ/см или плотность заряда 6-20 нКл/см². Далее, по мнению М.Бодэ, для эксплуатации оборудования наибольший риск представляют не максимальные (наихудшие) значения плотности потока излучений в течение 24 часов, а электронные возмущения меньшей плотности, но большей длительности (месяц и более). Исследования воздействия наихудших условий за 10 или за 24 часа не дают возможности оценить риски для длительных полётов. Таким образом, толщина экрана в 2,6 мм алюминия не гарантирует успешную работу приборов, если постоянная времени релаксации заряда очень велика (сотни часов).

3.1.4 Меры борьбы с поражающими факторами электризации.

Ещё одно возможное направление совершенствования мер защиты оборудования КА от космического излучения и соответственно особый путь исследования данной проблемы содержится в работе Бабкина Г.В., Иванова В.А., Морозова Е.П. [87]. Авторы отмечают актуальность поиска новых мер защиты от электростатических зарядов и приводят примеры выхода из строя дорогостоящих спутников в результате указанного явления (например, японский спутник «Эхо»). Не отрицая возможностей других подходов к решению проблемы внутренней электризации, они считают, что необходимо применять активные газоплазменные методы защиты КА. В качестве возможного кандидата на роль нейтрализатора заряда от потока электронов предлагаются элктроотрицательные газы (ЭОГ) для подавления электростатических разрядов, обусловленных внутренней электризацией изделий. Типичным представителем этой группы газов является SF_6 . Этот газ успешно используется в гексафторид серы высоковольтных переключателях. Для проверки своих предположений авторы исследования провели ряд экспериментов.

С целью проверки выдвинутого предположения о возможной антистатической эффективности ЭОГ, в частности, элегаза, ДЛЯ защиты от разрядов в бортовой радиоэлектронной аппаратуре КА, обусловленных ее внутренней электризацией, в ЦНИИ машиностроения был проведен ЦИКЛ экспериментов \mathbf{c} зарядкой различных диэлектрических и металл-диэлектрических образцов электронным пучком (энергия электронов 20 - 30 кэВ, плотность тока $\sim 10^{-8} \text{A/cm}^2$) в разреженной среде газов, в том числе ЭОГ, при их давлении в рабочей камере 10⁻⁴ - 10⁻³ мм.рт.ст. В качестве образцов использовались пленки полиэтилена, полиэтилентерефталата и лавсана на металлической подложке, а также типовые печатные платы с микросхемами [88].

Показано, что в среде SF_6 при давлении около 10^{-4} мм. рт. ст. потенциал образцов значительно снижался (до ~ 50%), а частота следования разрядов уменьшалась более чем на порядок, при этом оставшиеся редкие разрядные импульсы были в 2 - 3 раза слабее первичных по амплитуде. Менее значительное и менее устойчивое антистатическое оказывал также воздух, В составе которого электроотрицательный газ кислород, практически никакого воздействия не оказали другие газы (N₂, Ar), взятые для сравнения. Безусловно, что предложенный способ защиты от негативного влияния потока электронов на бортовую аппаратуру нуждается в натурных испытаниях в космосе. Но, тем не менее, данный подход может рассматриваться в качестве одного из направлений поисков путей нейтрализации факторов, вызывающих внутреннюю электризацию элементной базы КА.

Ещё одним направлением в изучении электризации КА с целью нейтрализации её негативных последствий является создание новых материалов для элементной базы бортовой аппаратуры, частности материалов для электронных печатных плат. В связи с этим, предложена новая концепция защиты современных космических аппаратов от поражающих факторов электризации – концепция «нанопроводимости диэлектриков» в дополнение к предыдущей «клетке Фарадея», которая с успехом использовалась для создания защиты от поражающих факторов электризации бортовой радиоэлектронной аппаратуры КА предыдущего поколения. В основу предложенной концепции положено требование, ограничивающее применение в КА диэлектрических материалов с проводимостью ниже значения 10^{-9} Ом⁻¹м⁻¹. Выполнение этого требования обеспечит сток зарядов из объема диэлектриков без электростатических разрядов и таким образом создаст адекватную защиту КА [63].

В заключении анализа подходов к исследованию факторов внутренней электризации КА и путей её нейтрализации в исследованиях и практики конструирования можно выделить несколько важных моментов, на которые делают акценты учёные и создатели космических кораблей в этой стране. Первое, что обращает на себя внимание – это создание разного рода руководств на основании работ американских и отечественных учёных и мирового опыта, цель которых донести до специалистовпрактиков результаты научных достижений. В работу над такими руководствами вовлечены десятки и сотни учёных, специалистов в узких областях исследований.

Второй момент, на котором хотелось бы остановиться – это основное направление в нейтрализации поражающих факторов космического излучения. Это экранирование спутников и правильный подбор материалов, из которых изготавливаются электронные платы и кабели, из которых в свою очередь создаётся аппаратура КА. Для получения всесторонней информации о поражающих факторах космических излучений и её влияния на те, или иные материалы в США и России развёрнуты многочисленные исследования. Есть экспериментальное тестирование и определение характеристик материалов на Земле И соответствующее математическое моделирование процессов, которые могут иметь место в космосе. Но более важны, как показали многие исследователи, натурные испытания и определения различных параметров материалов в реальном космическом полёте. При этом, довольно интересными и значимыми оказались результаты длительных исследований воздействия космических излучений на геостационарных аппаратах, которые продолжались 5, 10 и даже немногим более 20 лет. Испытания материалов в условиях реального полёта принесли совершенно иные результаты о количественных характеристиках, используемых в космонавтике материалов. Особенно интересно сложилась история изучения удельного объёмного сопротивления и «постоянной» затухания или релаксации заряда. Оказалось, что она (временная постоянная) может изменяться в связи с длительностью периода времени нахождения в космосе и количественные показатели удельного объёмного сопротивления и соответственно временная постоянная в космосе отличаются от тестовых замеров на Земле и причём очень существенно, в разы, как это имеет место при снижении радиационной электропроводности полимеров с набором дозы облучения [88]. Предложенная задача очень важна для определения материалов, пригодных для длительной эксплуатации в составе КА.

3.2 Лабораторное моделирование электризации полимеров потоками низкоэнергетических электронов

3.2.1 Введение

Интенсивное использование пучков моноэнергетических электронов с энергией в интервале 20–50 кэВ с целью изучения объемного заряжения полимерных пленок и внутренних электрических полей в них началось с середины 1970-х годов, в основном

трудами Гросса и сотр. [89-92]. Для получения пучков моноэнергетических электронов применяли электронные пушки, облучение проводили в вакууме при комнатной температуре, в качестве образцов использовали двухсторонне металлизированные пленки полимеров, а измеряли токи, стекающие с переднего (облучаемого) и тыльного электродов (в случае, когда пробег электронов был меньше толщины пленки, метод получил название расшепленного цилиндра Фарадея). Проведенные исследования позволили оценить радиационную электропроводность (РЭ) полимеров, а также поля в объеме полимера. Оказалось, что в толстом органическом стекле при его облучении электронами с энергией порядка 2 МэВ достигались пробойные значения поля (5–7) МВ/см и наблюдался объемный пробой на один из электродов с образованием характерного дерева пробоя (фигур Лихтенберга).

Однако уже в начале 1980-х годов центр тяжести этих исследований сместился на изучение условий образования электростатических разрядов (ЭСР) при облучении односторонне металлизированных полимерных облучаемых пленок, моноэнергетическими электронами с энергией 20-30 кэВ со стороны открытой поверхности (тыльный электрод заземлялся) [93.94]. Такое смещение акцента исследований диктовалось запросами космической техники. Выяснилось, что на космических аппаратах (КА) на геостационарной орбите происходит дифференциальная зарядка поверхности и наблюдаются многочисленные разряды, приводящие к сбою аппаратуры, а в ряде случаев и выходу всего КА из строя. Причиной дифференциальной зарядки служат потоки электронов с энергией 1-100 кэВ, возникающие в момент магнитной суббури и достигающие значений порядка 1 нА/см² для электронов с энергией порядка 20 кэВ [95].

Основной задачей этих исследований стало выяснение причин возникновения ЭСР и зависимости энергии этих разрядов от условий облучения (энергия электронов, плотность потока, наличие или отсутствие УФ-света, температура и степень вакуума). Было установлено, что ЭСР определенно могут быть двух типов: возникающие при объемном пробое полимера на подложку (ЭСР-ОП) и при скользящем пробое вдоль открытой поверхности полимера на ближайший заземленный металлический объект (ЭСР-СП), будь это граница раздела полимера и металла или конструкция вакуумной камеры. Оба эти вида разрядов хорошо известны из физики электрического пробоя твердых, жидких или газообразных диэлектриков.

Однако в ходе упомянутых выше исследований с использованием электронных ускорителей была выдвинута гипотеза о существовании еще одного, достаточно

специфического вида ЭСР, связанного с образованием двойного электрического слоя на облучаемой поверхности, получившего В литературе название радиационноэлектрического пробоя (РЭП) [95-97]. Вопрос о его существовании даже по результатам изучения электризации односторонне металлизированных полимерных пленок не является решенным [98, 99]. Тем более вызывает сомнение возможность его реализации в натурных условиях космического пространства. Данная работа посвящена лабораторному теоретическому анализу ПЕЧ природы экспериментальных фактов, предложенных в литературе для его оправдания.

3.2.2 Постановка эксперимента и теоретический анализ

Лабораторное моделирование электризации полимерных покрытий, используемых на внешней поверхности КА, проводилось на электронно-лучевой установке ЭЛА-50/5 и состояло в облучении этих покрытий моноэнергетическими электронами с энергией 10-50 кэВ при плотности потока 1-100 нА/см² в вакууме при комнатной температуре. Образцы представляли собой плоские пластины размером 150х150 мм. Поток электронов диаметром 40 мм облучал центр образца. Более подробное описание установки и ее технические характеристики изложены в [105]. Испытанные образцы полимеров и композитных материалов на основе полимеров охватывают следующие типичные классы. Это полимерные покрытия на А1 подложках, пленочные и тканые (в том числе с металлизированной вплетенной нитью) маты ЭВТИ, карбоновые проводящие конструкции с эпоксидным связующим.

Первопричиной образования высоких потенциалов на всех этих элементах конструкции является накопление электронов в полимерных материалах, являющихся хорошими диэлектриками. При достижении высоких отрицательных потенциалов на их открытой поверхности возможно возникновение электростатических разрядов. Теоретическому анализу подлежат две основные схемы заряжения полимерных диэлектриков.

Сначала рассмотрим первую из них (рис. 3.2). В ней облучается слой полимера, нанесенный на заземленную металлическую подложку. Толщина слоя значительно больше максимального пробега электронов, а вблизи облучаемого образца отсутствуют какие-либо заземленные металлические детали вакуумной камеры или измерительной схемы. Эта схема характерна для первого варианта испытаний полимерных образцов.

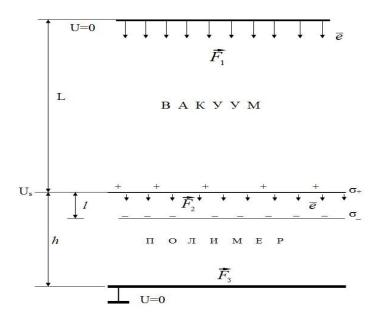


Рис. 3.2. Вариант постановки лабораторного эксперимента № 1.

Итак, облучается плоский слой полимера, металлизированный с тыльной стороны. Размер слоя в плоскости X-Y неограничен. Положительное направление оси Z совпадает с направлением движения электронов пучка, который проходит через плоскость нулевого потенциала на удалении L=50 см от свободной поверхности полимерного слоя (на этом расстоянии обычно находится выходное окно электронной пушки от испытуемого образца полимера). Энергия электронов $E_{e}=20$ кэВ, а плотность потока $\dot{J}_{b}=10^{-8}~\mathrm{A/cm^2}.$

Допустим, что равновесный потенциал поверхности составляет $U_s = -15$ кэВ. Это означает, что на каждый падающий электрон с облучаемой в вакууме открытой поверхности пленки ПЭТФ толщиной h = 200 мкм испускается в точности один электрон вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ). Анализ процессов заряжения полимера проведем лишь полуколичественно, принимая, что электроны с определенной энергией имеют строго фиксированный пробег (приближение "пробег—энергия"), мощность дозы в облучаемой области однородна, темновой проводимость полимера пренебрежимо мала, а рассматриваемая задача может считаться одномерной.

В начальный период облучения имеет место линейное во времени накопление отрицательного объемного заряда на длине экстраполированного пробега падающих электронов $l \approx 6.5$ мкм (потенциал открытой поверхности еще близок к нулю и не

оказывает влияния на энергию электронов пучка). Одновременно на самой этой поверхности происходит накопление положительного объемного заряда (также линейно во времени) за счет выхода из нее электронов вторичной электронной эмиссии. Скорость накопления положительного заряда заметно ниже, чем отрицательного (коэффициент ВЭЭ $\delta \approx 0.13$), так что $\sigma_{-=} j_b t$, а $\sigma_{+=} \delta j_b t$ (обе величины взяты по их арифметическому значению). Рассчитаем электрические поля и потенциалы над слоем полимера и внутри его (за плоскостями нулевого потенциала поля и потенциалы равны нулю).

Рассматриваемая задача легко решается в квазистационарном приближении, когда можно использовать соотношения электростатики (полем электронов пучка, естественно, пренебрегаем). Ниже мы уточняем результаты работы [100]. Найдем, что в вакуумном промежутке между срезом ускорителя и облучаемой поверхностью слоя действует однородное электрическое поле F_1 , тормозящее электроны пучка вследствие преобладающего накопления внутри полимера именно отрицательного заряда (если за положительное направление выбрать направление движения электронов, то это поле будет положительным). В облучаемой области оно изменит знак и заметно снизится по абсолютной величине (F_2 < 0), так что ток радиационной электропроводности начнет поставлять электроны из облучаемого объема на его поверхность, частично компенсируя их уход с нее в результате ВЭЭ. В необлучаемой области (поле F_3 снова положительно).

В общем случае на начальном этапе облучения справедливы следующие точные результаты (\mathcal{E} –относительная диэлектрическая проницаемость полимера, а \mathcal{E}_0 –электрическая постоянная):

$$F_{1} = \frac{\left[(h/L)(\sigma_{-} - \sigma_{+}) - \sigma_{-}l/L \right]}{\varepsilon \varepsilon_{0} (1 + h/\varepsilon L)},$$
(3.1)

$$F_{2} = \frac{\left[\sigma_{+} + \sigma_{-}(h - l) / \varepsilon L\right]}{\varepsilon \varepsilon_{0} (1 + h / \varepsilon L)}$$
(3.2)

$$F_{3} = \frac{\left[(\sigma_{+} - \sigma_{-}) - \sigma_{-} l / \varepsilon L \right]}{\varepsilon \varepsilon_{0} (1 + h / \varepsilon L)}$$
(3.3)

C учетом дополнительного неравенства $L\gg h\gg l$ формулы упрощаются (предполагается, что $\sigma_- \neq \sigma_+$)

$$F_{1} = (h/L)(\sigma_{-} - \sigma_{+})/\operatorname{EE}_{0}, F_{2} = [\sigma_{+} + \sigma_{-}h/\operatorname{EL}]/\operatorname{EE}_{0}, F_{3} = (\sigma_{+} - \sigma_{-})/\operatorname{EE}_{0}$$

Потенциал открытой поверхности

$$U_{s} = F_{3}(h-l) + F_{2}l \tag{3.4}$$

Сделаем подстановки параметров в эти формулы формул для t=1с ($\mathcal{E}=3.2$). Найдем, что $F_3=-3.1\times 10^4$ В/см, $F_2=4.6\times 10^3$ В/см, $F_1=11$ В/см и поверхностный потенциал $U_s=-430$ В. Видно, что он еще значительно меньше потенциала остановки пучка (-20 кВ).

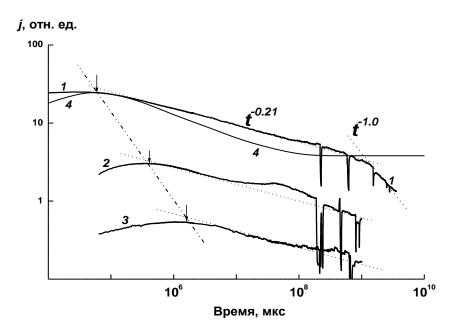


Рис. 3.3. Кривые переходного тока в ПЭТФ. Мощность дозы 740 (1), 74 (2) и 7.4 Гр/с (3). Стрелками на кривых 2 и 3 обозначены времена достижения максимума тока (0.34 и 3.2 с соответственно). Для кривой 1 значение этого времени равно 0.036 с (кривая 1', ход исходной кривой искажен конечным временем открытия заслонки) [101].

Мощность дозы в облучаемой области R=160 Гр/с и для радиационной электропроводности (РЭ) γ_r ПЭТФ в слабых полях к 1-ой секунде облучения $K_r \approx_{1.3 \times 10^{-16}} \Phi$ см $^{-1}$ Гр $^{-1}$ [101] и рис. 3.3) получим значение $\gamma_r = K_r R_{=2.0 \times 10^{-14}} \Phi$ См $^{-1}$ См $^{-1}$ (радиационно-индуцированный ток находится в районе максимума кинетической кривой). Отсюда следует, что ток натекания электронов на открытую поверхность за счет РЭ по облучаемому слою не превышает 9.2×10^{-11} А/см 2 (скорость удаления электронов из поверхностного слоя за счет ВЭЭ равна $\delta j_b = 1.3 \times 10^{-9}$ А/см 2 и почти в 14 раз больше).

При дальнейшем облучении все поля, как и поверхностный потенциал, растут по абсолютной величине, пока не устанавливается стационарный режим облучения. Рассмотрим этот вопрос более подробно. Установившийся поверхностный потенциал $U_{s=-15}$ кВ, так что электроны пучка достигают поверхности с энергией $E_{e=5}$ кэВ, пробег которых сокращается до 0.9 мкм, а мощность дозы в облучаемой области возрастает почти в 2 раза. Прямой расчет поверхностных зарядов σ_+ и σ_- теперь невозможен, поэтому для оценки полей используем другой подход. В стационарном режиме вторично-эмиссионный ток в точности уравновешивается током натекания электронов на открытую поверхность за счет РЭ в облучаемом слое. При длительном облучении РЭ определенно пройдет через максимум при $t \approx (0.5-2)$ с. но эффект сильного поля частично скомпенсирует падение РЭ. Примем, что при временах облучения порядка нескольких минут K_r увеличится в 2 раза (рис. 3.3).. В этих условиях поле в облучаемой области F_2 окажется близким к значению 3.6×10^5 В/см при падании напряжения на слое 32 В. Поле в необлучаемой области составит $F_3 \approx -15 \text{ кB}/200 \text{ мкм } (7.5 \times 10^5 \text{ B/cm})$. Оба поля достаточно велики, но в геометрии открытой поверхности не должны привести к пробою (для этого необходимы поля в 6-8 раз большие) [102]. В проведенных нами первом экспериментах электростатические разряды при варианте облучения действительно не наблюдались.

Таким образом, возможно стационарное состояние при облучении толстых односторонне металлизированных пленок полимеров, которое достигается исключительно за счет вторичной электронной эмиссии, усиленной электрическим полем. Наличие РЭ по облучаемой области делает развитие пробоя по этому слою практически невероятным, так

как случайная его флуктуация в сторону дальнейшего роста приведет к сверхлинейному возрастанию РЭ и убыли положительного заряда на поверхности (отрицательная обратная связь). Таким образом, мы имеем дело с устойчивым состоянием равновесия.

Допустим, что в установившемся режиме облучения слой полимера начинает освещаться мощным потоком УФ квантов света, обеспечивающим плотность потока фотоэлектронов $1.5\times10^{-8}~\text{A/cm}^2$, которая в 1.5~раза больше \dot{J}_b . Это приведет к развитию нестационарного процесса, заканчивающегося новым квазиравновесием. Оценим его параметры.

Совершенно очевидно, что в новом равновесии суммарный ток уходящих с поверхности электронов должен по-прежнему составлять 10^{-8} A/cm². Для этого необходимо, чтобы потенциал поверхности стал немного положительным и таким образом снизил бы плотность тока фотоэлектронов, средняя энергия которых совсем невелика (порядка 10 эВ). В результате электроны пучка станут достигать поверхности полимера с начальной энергией 20 кэВ, и их коэффициент ВЭЭ восстановит первоначальное значение $\delta = 0.13$. Задача нового поверхностного потенциала $\tilde{U}_s \approx +30$ В состоит в снижении плотности тока фотоэлектронов до 0.87 j_b , возвращая часть их потока обратно на поверхность.

В такой ситуации электроны пучка начнут проникать в полимер до их экстраполированного пробега $l \approx 6.5$ мкм. Плотность тока РЭ в поле \tilde{F}_2 должна составить 0.13 j_b . Мощность дозы в облучаемой области R=160 Гр/с, и даже для $K_r \approx 10^{-16}$ Ф см⁻¹ Гр⁻¹ необходимое поле составит 0.8×10^5 В/см при падении напряжения на облучаемом слое 52 В. Таким образом, получаем, что в новом равновесном состоянии \tilde{U}_s положителен и приблизительно составляет 30 В, а максимальный отрицательный потенциал находится на глубине пробега электронов и составляет всего минус 22 В. Фактически, такая мощная засветка полностью разряжает полимерный слой, что сопровождается протеканием токов в цепи подложки. Здесь уместно заметить о практически полной аналогии рассмотренного случая с облучением того же самого полимера в тех же условиях, но при нанесении металлических заземленных электродов на обе стороны пленки [91,92].

Вторая схема облучения (рис. 3.4) предполагает наличие заземленного металлического предмета (кольца) в непосредственном контакте с открытой диэлектрической поверхностью, подвергающейся воздействию электронного пучка. Эта схема реализуется в двух других классах испытуемых элементов. Весь прежний ход рассуждений сохраняет свою силу для большей части поверхности, удаленной более чем на 30-50 см от края маски. Начальную энергию электронов пучка по-прежнему считаем равной 20 кэВ. Ниже модифицируется подход к данной проблеме, изложенный в работе [103].

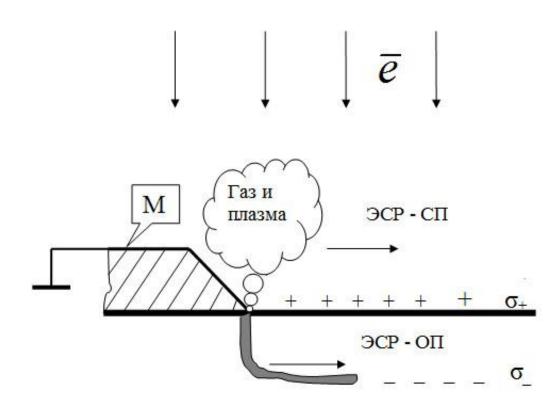


Рис. 3.4 Вариант постановки лабораторного эксперимента № 2.

Вблизи от маски М (рис.3.4) распределение поля резко изменяется. Слой положительного заряда находится в прямом контакте с маской. Превалирующий отрицательный заряд находится не ближе 5 мкм от нее. Ввиду малого радиуса закругления края маски в непосредственной близости от нее имеет место локальное увеличение поля от 20 до 100 раз, причем на маске наводятся отрицательные заряды, индуцированные положительными зарядами на поверхности полимера. Это поле вблизи маски направлено вдоль поверхности. Создаются идеальные условия для инициирования искрового разряда за счет автоэлектронной эмиссии из маски, выступающей в роли катода. Происходит

выброс испаренного металла и полимера в вакуум, ионизация испарившихся молекул ускоренными в этом поле эмитированными электронами и образуется плазма со средним потенциалом близким к нулю. Она начнет расширяться, разряжая положительный заряд и образуя каналы на поверхности полимера. Скорость распространения разрядного фронта вдоль поверхности полимера достигает 20 км/с.

Как только произойдет поверхностный пробой, сразу же пробьется и тонкий (5 мкм) слой полимера (главный канал перпендикулярен поверхности) и начнется развитие пробоя в плоскости отрицательного заряда, сопровождающийся образованием многочисленных трубчатых каналов (фигур Лихтенберга). Теория этого скользящего поверхностного пробоя в настоящее время отсутствует.

Понятно, что для начала скользящего искрового пробоя маски на диэлектрик необходимо меньшее значения поверхностного потенциала, чем при его сквозном пробое на подложку, и, по всей видимости, именно он доставляет наибольшую опасность на борту КА с точки зрения возникновения электростатических разрядов. В проведенных нами экспериментах наблюдались электростатические разряды именно этого типа.

В ряде случаев, напыляя проводящий слой на поверхность диэлектрического материала и соединяя его с корпусом (подложкой) гальванически (сопротивление не больше 1 МОм), удается устранить ЭСР вообще [91]. Очевидно, что в этом случае картина заряжения принципиально отличается от облучения диэлектрика с открытой поверхностью, так как теперь существует прямой путь для сброса заряда на заземленный (соединенный с корпусом объекта) облучаемый электрод за счет радиационной электропроводности диэлектрика. Еще более радикальное средство борьбы электризацией полимерных покрытий на КА заключается в применении материалов с умеренно низким объемным сопротивлением порядка 109 Ом.м, что позволит снизить потенциал открытой поверхности до безопасных с точки зрения пробоя значений. Действительно, при плотности потока 1 нА/см² (что характерно для наиболее сильных суббурь на геостационарной орбите) этот потенциал составит только около 100 В и пробой окажется полностью исключенным.

Аналогично, использование метало-тканых ЭВТИ с размером сетки металлических нитей порядка 0.5 см (для стороны квадрата) с пониженной плотностью (0.4 г/см³) уже сейчас решает проблему их электризации на геостационарной орбите.

В заключение коснемся вопроса о представительности испытаний с использованием пучков моноэнергетических электронов. Известно, что реальный спектр электронов суббури на геостационарной орбите простирается от нескольких сотен

электрон-вольт до десятков мегавольт, является двухмодальным с максимумами в районе 0.3 и 7 кэВ, причем интегрально преобладают электроны именно малых энергий. В интервале энергий 0.1-3.0 кэВ для большинства полимеров $\delta \ge 1.0$, и, казалось бы, их действие может быть уподоблено фотонам УФ-излучения, тем более что их интегральный поток существенно превышает поток электронов с энергией 20-50 кэВ, наиболее опасных с точки зрения электризации полимерных слоев. В таком случае это явление можно было бы рассматривать как происходящее в условиях засветки при потоке фотонов, значительно превосходящем поток электронов, т.е. в условиях виртуального заземления облучаемой поверхности слоя (облучение слоя в короткозамкнутой геометрии [91, 92, 104-105]). По всей видимости, это не так. Действительно, стоит корпусу КА зарядиться до отрицательного потенциала порядка 1 кВ, как низкоэнергетические электроны не смогут достигать поверхности аппарата и окажутся исключенными из игры. В данном случае мы имеем дело с состоянием неустойчивого равновесия в отличие от фотонов, которые не несут электрического заряда и обеспечивают плотности тока фотоэлектронов (1-5) н A/cm^2 при освещении прямым солнечным светом. В целом, этот вопрос требует своего дальнейшего уточнения.

Кроме того, учет присутствия быстрых электронов с энергией $E_e \ge 0.1\,$ МэВ с мощностью дозы порядка $0.01\,$ Гр/с также частично способствует дополнительному стоку тормозящихся в слое электронов на подложку. Роль этого канала стока на облучаемую поверхность слоя невелика и может не учитываться.

3.3 Приближенный метод расчета растекания токов по элементам конструкции космического annapama при электростатических разрядах

Одним из важнейших способов исключения возможных негативных последствий для КА, являющихся результатом воздействия электростатического разряда, представляется моделирование картины растекания токов по поверхности КА и расчет величин возникающих помеховых сигналов во фрагментах БКС, проложенных по внешней поверхности КА, еще на этапе проектирования этого аппарата. С этой целью в МИЭМ была разработана структурная электрофизическая модель (СЭМ) электризации КА и программное обеспечение (ПО) «Satellite-MIEM» для ее реализации [107-109].

Принципы построения СЭМ КА основаны на представлении КА в виде эквивалентной электрической схемы (ЭЭС) из сосредоточенных R, L и C элементов [106].

Для реализации метода СЭМ корпус корабля с навесными элементами разбивается на цилиндр, тор, плоскости, стержни и т.п. При необходимости проводится кусочнолинейная аппроксимация реальных поверхностей КА сложной формы.

ПО «Satellite-MIEM» синтезирует СЭМ на базе заданной полигональной 3D-модели КА. Полигональная модель (которую можно подготовить, например, в пакете 3dsMax) состоит из совокупности элементарных фигур — треугольников или прямоугольников, преобразуемых средствами программы в поверхностную сетку: совокупность связанных узлов. Каждая связь (ветвь) представляется в виде элементов электрической цепи, в целом образующих эквивалентную электрическую схему поверхности КА.

Зная возможные места возникновения ЭСР, можно рассчитать картину растекания переходных токов по корпусу и навесным элементам КА. При этом ЭСР представляются в виде импульсного источника тока с заранее заданными характеристиками, соответствующими параметрами разряда. Данные источники подключаются к точкам, между которыми возможно возникновение ЭСР. Затем рассчитываются переходные токи.

Для расчета величины помехового сигнала во фрагменте БКС необходимо указать трассу прокладки этого фрагмента по внешней поверхности КА и ответить на запрос диалоговой системы СЭМ о величине коэффициента трансформации тока, протекающего по поверхности КА в напряжение наводки в БКС. Этот коэффициент определяется экспериментально для данного фрагмента БКС с помощью разработанного в МИЭМ испытательного генератора помех ИГП-2 «Дуга» [107].

Анализ СЭМ позволяет произвести расчет переходных токов в корпусе КА и указать участки поверхности, вблизи которых нежелательно размещение фрагментов БКС. Кроме того, на этапе эскизного проектирования КА разработчики электронных блоков получают параметры импульсных помех в БКС на входах этих блоков.

Для расчета переходных токов синтезированной СЭМ ПО «Satellite-MIEM» использует программу расчета электрических схем SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, программа моделирования с ориентацией на интегральные схемы).

Нами были проведены расчеты переходных токов ЭЭС и вычислены наводки во фрагментах БКС с помощью программы PSpice. Был сделан следующий вывод: результат растекания токов на больших ЭЭС (количество узлов схемы равно 150 000) на современных персональных ЭВМ либо не может быть получен (случай RLC-схемы), либо расчет занимает очень много машинного времени (около 20 часов для схемы, содержащей

только резисторы в ветвях). На рис. 3.5 приведены затраты машинного времени на экспериментальные расчеты растекания переходных токов от ЭСР на плоскости, содержащей различное количество узлов. Исследования показали, что время, затраченное на решение системы 2000 и более обыкновенных дифференциальных уравнений (RLC-схема) в ПО PSpice, неприемлемо для расчетов. Возникла необходимость сокращения времени расчета растекания токов по поверхности КА.

В настоящей работе предложен метод приближенного ускоренного расчета растекания токов от электростатического разряда по поверхности космического аппарата. Особенностью метода является проведение расчетов переходных токов лишь в локальной зоне схемы КА. Проведенные эксперименты в программе «Satellite-MIEM» показывают, что область, в которой значения переходных токов в ветвях не больше величины в 1-2 % от величины ЭСР, представляет собой 400 узлов вокруг места возникновения ЭСР. А значения переходных токов в ветвях, не превышающие величины в 1-2 % от величины ЭСР, считаются незначительными в связи с тем, что электромагнитные помехи от таких переходных токов оказывают слишком слабое влияние на бортовую радиоэлектронную аппаратуру KA. Поэтому ДЛЯ ускоренного расчета растекания токов электростатического разряда по поверхности космического аппарата рационально использовать предложенный в настоящей работе метод.

Суть метода состоит в построении ограниченной области расчета растекания токов. Расчет переходных токов будет происходить только в этой, обозначенной пользователем зоне СЭМ, не затрагивая ее остальную часть. Для этого предлагается преобразовать файл, получаемый на вход программе PSpice. После определения узла эквивалентной схемы, в котором произошел ЭСР, выделяется область прилегающих к месту разряда узлов (рис. 3.6). Размер выделяемой области зависит от требуемого значения погрешности расчета растекания переходных токов по корпусу КА, введенного пользователем. Так, например, указав погрешность, равную 9%, будет выделена область, равная 441 узлу вокруг узла, в котором произошел ЭСР, а при погрешности, равной 1%, выделенная область будет состоять из 1681 узла.

При выделении локальной области, а значит, при сокращении размерности модели в n раз время расчета переходных токов уменьшается в n³ раз. Применение метода выделенных областей оправдано при наличии схемы KA большой размерности. Алгоритм метода расчета наводок в выделенной области во фрагментах БКС KA показан на рис. 3.7.

Результатом применения данного метода является значительное сокращение времени расчета переходных токов по поверхности КА с заданной пользователем

погрешностью. Погрешность была рассчитана на плоскости в области, значения переходных токов в ветвях которой не больше величины в 1-2 % от величины ЭСР. Было выяснено, что с расширением выделяемой области, а значит, с увеличением количества узлов вокруг заданного ЭСР погрешность уменьшается (рис. 3.8). При выделении 1681 узла вокруг точки разряда погрешность становится незначительной (равной 1 %) и вполне приемлемой для реальных расчетов. Основное преимущество данного подхода состоит в возможности считать на современных ЭВМ RLC-схемы большой размерности за короткое время.

В настоящей работе изложены вопросы, касающиеся решения задач на плоскости. В дальнейшем планируется применять метод для расчетов растекания токов по поверхности КА, состоящему из более сложных геометрических элементов конструкции космического аппарата.

Окончательное решение о восприимчивости бортовой аппаратуры (БА) КА к воздействию ЭСР производится разработчиком аппаратуры на основе разработанного метода контроля работоспособности БА при воздействии на нее наводок от ЭСР и проверки на соответствие заданным требованиям.

В случае нарушения штатного режима работы какой-либо системы отдел-куратор (разработчик) системы проводит анализ причин нарушения и при необходимости, принимает решение о доработке системы, после чего вновь проводятся испытания.

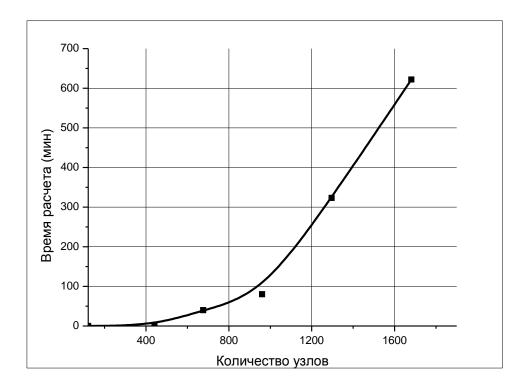


Рис.3.5 График зависимости времени расчета от количества узлов модели.

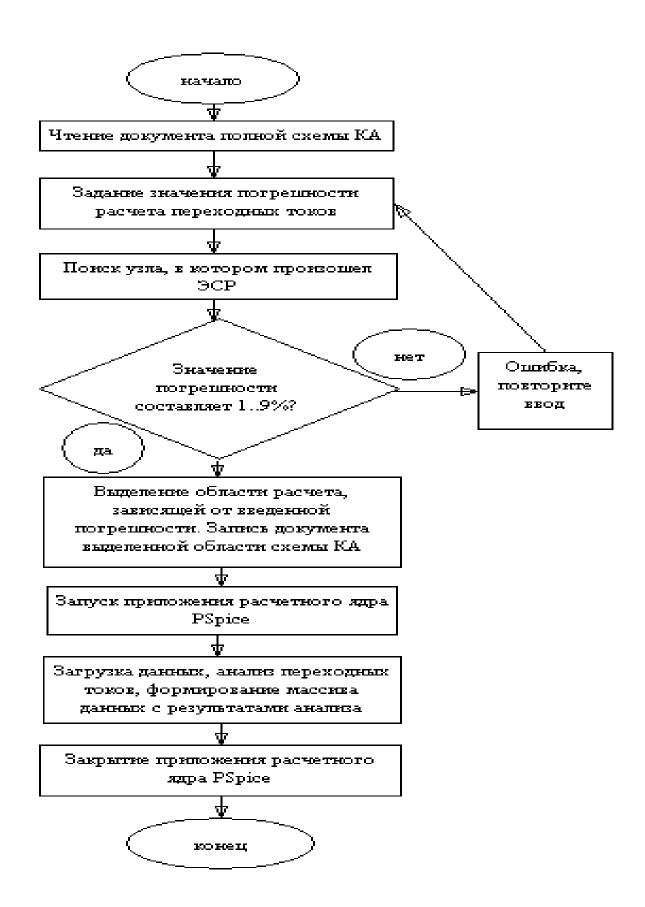


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритма выделения областей



Рис. 3.7 Блок-схема алгоритма метода расчета наводок во фрагментах БКС КА проложенных в выделенной области.

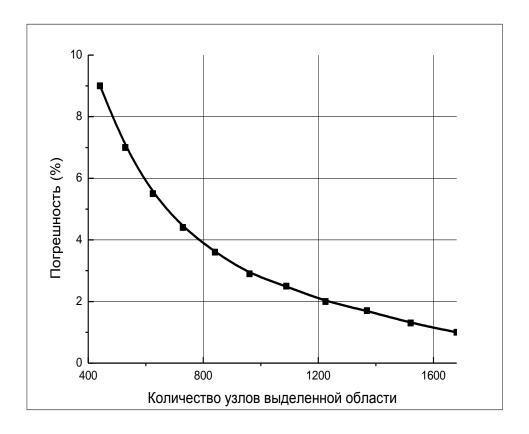


Рис. 3.8. График зависимости погрешности расчета от количества узлов выделенной области.

3.4 Исследование и разработка методов и средств компьютерного моделирования процесса растекания токов по корпусу космического аппарата.

Работы по решению проблемы электризации космических аппаратов (КА) начались с начала 70-х годов 20-го века при освоении геостационарной орбиты [110-115]. Электризация КА происходит в результате его взаимодействия с окружающей плазмой и солнечным электромагнитным излучением, поэтому эффекты электризации наиболее сильно проявляются во время геомагнитных возмущений (суббурь) в магнитосфере Земли. Различные участки поверхности КА, изготовленные из материалов с различными электрофизическими характеристиками, заряжаются до разных потенциалов, что приводит к возникновению электростатических разрядов (ЭСР). Это происходит, когда возникающие вследствие электризации электрические поля превышают критические, превышающие пробивную прочность материалов внешней поверхности КА или вакуумных промежутков между элементами конструкции КА, которые имеют большую разность потенциалов. ЭСР, которые являются следствием электризации, оказывают

негативное влияние на работу бортовой радиоэлектронной аппаратуры КА. Электромагнитные помехи, создаваемые ЭСР, вызывают сбои в работе различных бортовых систем КА, а интенсивные разрядные токи могут привести к необратимым повреждениям элементов аппаратуры. Основными рецепторами импульсных помех от ЭСР являются фрагменты бортовой кабельной сети (БКС), проложенные по внешней поверхности КА [116].

Попытки полного исключения возможности возникновения ЭСР путем подбора материалов внешней поверхности КА или активной защиты КА пока не очень успешны. Удается снизить частоту и мощность ЭСР, но не исключить их полностью [117]. Поэтому необходимо принимать дополнительные меры для безотказной работы электроники КА, при воздействии на нее ЭСР. Для расчета величины наводок в БКС в МИЭМ разработана структурная электрофизическая модель (СЭМ) электризации КА и программное обеспечение (ПО) «Satellite-MIEM» для ее реализации [118-119].

СЭМ КА - эквивалентная электрическая схема поверхности КА из сосредоточенных R, L и C элементов. Для построения СЭМ корпус КА с навесными элементами разбивается на такие геометрические тела, как цилиндр, сфера, тор, плоскость, стержень и т.д.

ПО «Satellite-MIEM» синтезирует СЭМ на базе заданной полигональной 3D-модели КА. Полигональную модель, состоящую из совокупности прямоугольников или треугольников можно легко и быстро построить в пакете 3dsMax. Затем модель экспортируется в ПО «Satellite-MIEM», где преобразуется в поверхностную сетку: совокупность связанных узлов. Каждая связь (ветвь) представляется в виде элементов электрической цепи, в целом образующих эквивалентную электрическую схему поверхности КА.

При наличии информации о возможных местах возникновения ЭСР можно рассчитать картину растекания переходных токов по корпусу и навесным элементам КА. При этом ЭСР представляются в виде импульсного источника тока с заранее заданными характеристиками, соответствующими параметрами разряда. Данные источники подключаются к точкам, между которыми возможно возникновение ЭСР. Далее рассчитываются переходные токи.

Для расчета величины помехового сигнала во фрагменте БКС средствами ПО прокладывается трасса этого фрагмента по внешней поверхности КА, вводится величина коэффициента трансформации тока [120], протекающего по поверхности КА, в напряжение наводки в БКС. Расчетные данные по уровням помеховых сигналов на входах

электронных блоков, полученные на этапе эскизного проектирования КА, включаются в ТЗ на изготовление этих блоков. В соответствие с таким ТЗ электронный блок должен работать без сбоев при этом расчетном уровне помехового сигнала.

Для расчета картины растекания переходных токов по СЭМ КА ПО «Satellite-MIEM» использует известную программу расчета электрических схем PSpice из пакета OrCAD. Анализ СЭМ, состоящей из 150 000 узлов и более на современных ПК в такой программе невозможен по причине огромной трудоемкости, затрачиваемой ЭВМ на решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) методом Рунге-Кутта. Исследования показали, что время, затраченное на решение системы 2000 и более ОДУ в ПО PSpice, неприемлемо для расчетов [121]. Возникла необходимость проводить анализ СЭМ КА с адекватными временными затратами.

В работе [121] был предложен метод приближенного ускоренного расчета растекания токов от электростатического разряда по поверхности космического аппарата. Особенностью метода является проведение расчетов переходных токов лишь в локальной зоне схемы КА. Использование этого ускоренного метода адекватно и оправдано. Проведенные эксперименты в программе «Satellite-MIEM» показывают, что область, в которой значения переходных токов в ветвях не больше величины в 1-2 % от величины ЭСР, представляет собой 400 узлов вокруг места возникновения ЭСР. А значения переходных токов в дальних ветвях, не превышающие величины в 1-2 % от амплитуды тока в точке приложения ЭСР, считаются незначительными в связи с тем, что электромагнитные помехи от таких переходных токов оказывают слишком слабое влияние на бортовую радиоэлектронную аппаратуру КА.

Суть метода состоит в построении ограниченной области расчета растекания токов. Расчет переходных токов будет происходить только в этой, обозначенной пользователем зоне СЭМ, не затрагивая ее остальную часть.

Основным недостатком метода является то, что для его реализации требуется стороннее ПО (PSpice). В данной работе предлагается другой метод, лишенный этого недостатка.

Представим стоящую перед нами задачу на языке математики. СЭМ КА может быть сформирована в расширенном однородном координатном базисе (РОКБ) и записана в виде системы линейных ОДУ:

$$C\frac{d}{dt}\overline{X}(t) + G\overline{X}(t) = \overline{Y}(t), \quad \overline{X}(0) = \overline{X}_0, \tag{3.5}$$

где C,G — числовые матрицы порядка $(n \times n)$, причем C - матрица емкостей и индуктивностей, G - матрица сопротивляемостей, $\overline{X}(t)$ - вектор искомых фазовых переменных (напряжений во всех узлах схемы и токов, протекающих через индуктивные элементы), $\overline{Y}(t)$ - вектор входных сигналов.

Необходимо с минимальными временными затратами выполнить решение системы уравнений в момент времени t^* , т. е. вычислить числовой вектор $\overline{X}(t^*)$.

Для расчета переходного процесса системы уравнений необходимо решать систему (3.5). Возможно использование различных методов решения задачи, численных, численноаналитических, основанных на макромоделировании и т. д.

В настоящее время известно множество численных методов выполнения решения системы (3.5). Наиболее простыми являются методы Эйлера.

Явный метод Эйлера решения системы уравнений

$$\frac{d}{dt}\overline{X}(t) = F[\overline{X}(t)] \overline{X}(0) = \overline{X}_0.$$

может быть получен на основе разложения решения в усеченный ряд Тейлора в окрестности h_i какой-либо точки t_i

$$\overline{X}(t_i + h_i) = \overline{X}(t_i) + \frac{d}{dt}\overline{X}(t_i)h_i + o(h_i^2)$$

откуда

$$\dot{\bar{X}}(t_i) = (\bar{X}(t_{i+1}) - \bar{X}(t_i))h^{-1}$$

где $t_{i+1} = t_i + h_i$, h_i - величина текущего шага по оси времен.

Более простая форма записи явного метода Эйлера:

$$\dot{\bar{X}}_{i} = (\bar{X}_{i+1} - \bar{X}_{i})h^{-1}, \tag{3.6}$$

Неявный метод Эйлера выводится также из разложения решения в усеченный ряд Тейлора

$$\overline{X}(t_i - h_i) = \overline{X}(t_i) - \frac{d}{dt}\overline{X}(t_i)h_i + o(h_i^2)$$

откуда

$$\dot{\bar{X}}(t_i) = (\bar{X}(t_i) - \bar{X}(t_{i-1}))h^{-1}$$

или

$$\dot{\bar{X}}(t_{i+1}) = (\bar{X}(t_{i+1}) - \bar{X}(t_i))h^{-1}$$

или

$$\dot{\bar{X}}_{i+1} = (\bar{X}_{i+1} - \bar{X}_i)h^{-1}, \tag{3.7}$$

Разработанный нами алгоритм макромоделирования состоит в предварительном преобразовании задач (3.6) и (3.7) в некоторую редуцированную модель схемы КА, количество уравнений в которой будет равно m << n, что снижает трудоемкость вычислений. Особенностью метода является проведение расчетов переходных токов лишь в локальной зоне схемы КА. Как ранее указывалось данное действие корректно в связи со слишком малым влиянием на БРЭА КА расчетных значений электромагнитных помех вне выделенной области, равной 400 узлам. Поэтому для ускоренного расчета растекания токов от ЭСР по поверхности КА рационально использовать предложенный в настоящей работе метод.

Представим математическую модель СЭМ КА в блочной форме:

$$\begin{bmatrix}
C_{11} & C_{12} \\
C_{21} & C_{22}(Q)
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\dot{\overline{X}}_1 \\
\dot{\overline{X}}_2
\end{bmatrix} +
\begin{bmatrix}
G_{11} & G_{12} \\
G_{21} & G_{22}(Q)
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\overline{X}_1 \\
\overline{X}_2
\end{bmatrix} =
\begin{bmatrix}
\overline{Y}_1 \\
\overline{Y}_2
\end{bmatrix}, \qquad \overline{X}(0) = \overline{X}_0, \tag{3.8}$$

где Q — варьируемые параметры, матрицы G, C — невырожденные. Будем считать, что подвектор \overline{X}_2 содержит m << n искомых коэффициентов решения. Отметим отсутствие у данной модели специфики. Вывод вычислительной схемы, учитывающей ряд особенностей модели схемы KA приведен в [122].

Запишем оба вида вычислительных процессов в блочной форме, подставив выражения производных (3.6) и (3.7) в модель (3.8):

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22}(Q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\bar{X}_1)_{i+1} - (\bar{X}_1)_i \\ (\bar{X}_2)_{i+1} - (X_2)_i \end{bmatrix} h^{-1} + \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22}(Q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\bar{X}_1)_i \\ (\bar{X}_2)_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_1 \\ \bar{Y}_2 \end{bmatrix},$$
(3.9)

$$\begin{bmatrix}
C_{11} & C_{12} \\
C_{21} & C_{22}(Q)
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
(\overline{X}_{1})_{i+1} - (\overline{X}_{1})_{i} \\
(\overline{X}_{2})_{i+1} - (X_{2})_{i}
\end{bmatrix}
h^{-1} +
\begin{bmatrix}
G_{11} & G_{12} \\
G_{21} & G_{22}(Q)
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
(\overline{X}_{1})_{i+1} \\
(\overline{X}_{2})_{i+1}
\end{bmatrix} =
\begin{bmatrix}
\overline{Y}_{1} \\
\overline{Y}_{2}
\end{bmatrix},$$
(3.10)

Необходимо на базе выражений (3.9) и (3.10) сформулировать новую вычислительную схему, из которой будет исключен подвектор \overline{X}_1 . Для этого запишем (3.9) и (3.10) в виде следующих подсистем уравнений:

$$(G_{11}-C_{11}h^{-1})(\overline{X}_{1})_{i}+(G_{12}-C_{12}h^{-1})(\overline{X}_{2})_{i}+C_{11}h^{-1}(\overline{X}_{1})_{i+1}+C_{12}h^{-1}(\overline{X}_{2})_{i+1}=\overline{Y}_{1},$$

$$(3.9.1)$$

$$(G_{21}-C_{21}h^{-1})(\overline{X}_{1})_{i}+(G_{22}(Q)-C_{22}(Q)h^{-1})(\overline{X}_{2})_{i}+C_{21}h^{-1}(\overline{X}_{1})_{i+1}+C_{22}(Q)h^{-1}(\overline{X}_{2})_{i+1}=\overline{Y}_{2},$$

$$(3.9.2)$$

$$(C_{11}h^{-1} + G_{11})(\overline{X}_1)_{i+1} + (C_{12}h^{-1} + G_{12})(\overline{X}_2)_{i+1} - C_{11}h^{-1}(\overline{X}_1)_i - C_{12}h^{-1}(\overline{X}_2)_i = \overline{Y}_1,$$
(3.10.1)

$$(G_{21}+C_{21}h^{-1})(\overline{X}_1)_{i+1}+(G_{22}(Q)+C_{22}(Q)h^{-1})(\overline{X}_2)_{i+1}-C_{21}h^{-1}(\overline{X}_1)_i-C_{22}(Q)h^{-1}(\overline{X}_2)_i=\overline{Y}_2,$$

$$(3.10.2)$$

Выражения (3.9.1), (3.9.2), (3.10.1), (3.10.2) будем рассматривать как аналог системы из 4-х уравнений с четырьмя неизвестными $(\overline{X}_1)_i, (\overline{X}_1)_{i+1}, (\overline{X}_2)_i, (\overline{X}_2)_{i+1}$ опирающейся на вычислительные процессы явного и неявного типов.

После исключения из модели подвекторов $(\bar{X}_1)_i, (\bar{X}_1)_{i+1}$ и перемножения всех матриц получим вычислительную схему:

$$A_{1}(h)(\overline{X}_{2})_{i+1} = \overline{Y}_{2} - A_{2}(h)\overline{Y}_{1} + A_{3}(h)(\overline{X}_{2})_{i},$$
(3.11)

где $A_1(h), A_3(h)$ - числовые $(m \times m)$ - матрицы, зависящие от величины шага h, $A_2(h)$ - числовая $(m \times n)$ - матрица, зависящая от величины шага h.

Поскольку на практике подвектор \overline{Y}_1 будет нулевым, то выражение (3.11) будет упрощено:

$$A_1(h)(\overline{X}_2)_{i+1} = \overline{Y}_2 + A_3(h)(\overline{X}_2)_i, \tag{3.12}$$

По построению матрица $A_{\rm I}(h)$ невырождена, поэтому от нее может быть вычислена обратная матрица, после умножения на которую, получим вычислительную схему в виде:

$$(\overline{X}_2)_{i+1} = B_1(h)\overline{Y}_2 + B_2(h)(\overline{X}_2)_i, \tag{3.13}$$

где $B_1(h), B_2(h)$ - числовые $(m \times m)$ - матрицы, зависящие от величины параметра h.

Трудоемкость Т процесса построения вычислительной схемы (3.13):

 $T \approx 24n^3 + 12mn^2 + 46n^2 + 4m^2n + 4m^3 + 6m^2 + 30mn + 2m + n$ вещественных мультипликативных операций (ВМО).

Такой подход к макромоделированию эквивалентных электрических схем KA довольно трудоемок. Но его применение оправдано при условиях:

- 1) при наличии схемы КА большой размерности;
- 2) при многократном использовании макромодели;

3) при значительном интервале времени t^* , т. е., когда требуется вычислить числовой вектор $\overline{X}(t^*)$, проделав большое количество шагов.

Трудоемкость вычислений по формуле (3.13) при измененном шаге составит $3m^2$ ВМО, а при постоянном шаге - m^2 ВМО. При n=150000 и m=400 для плотных матриц скорость вычислений по сравнению с неявным методом Эйлера увеличится в 7031250000 раз, а по сравнению с явным методом Эйлера в 46875 раз.

Основные этапы расчета на ЭВМ наводок во фрагментах БКС КА с помощью построения макромоделей по вычислительной схеме методов Эйлера:

- Шаг 1. Преобразование файла схемы КА в матричный вид. Формирование модели схемы в РОКБ.
- Шаг 2. Построение макромодели СЭМ КА на основе явного и неявного методов Эйлера.
 - Шаг 3. Расчет вектора фазовых переменных по макромоделям.
- Шаг 4. Вывод вектора фазовых переменных. Построение картины растекания токов по поверхности КА.
- Шаг 5. Вычисление величины наводки в кабеле на основе картины растекания токов и коэффициенте трансформации тока протекающего по элементу КА в напряжение наводки.

По предложенному методу были проведены тестовые расчеты и их сравнение с расчетами, выполненными традиционными методами. Сравнение результатов расчетов показало их полную адекватность. В настоящее время проводится стыковка представленного в настоящей работе метода с ПО «Satellite-MIEM».

3.5 Выводы по главе.

В плане разработки макромоделей и метода приближенного расчета эквивалентных схем большой размерности для крупногабаритных космических аппаратов (КА) повышенной сложности нами был предложен метод выделенных областей, в основе которого лежит проведение расчетов переходных токов лишь в локальной зоне схемы космического аппарата. Проведенные эксперименты в программе «Satellite-MIEM» показывают, что область, в которой значения переходных токов в ветвях не больше величины в 1-2 % от величины электростатического разряда (ЭСР), представляет собой 400 узлов вокруг места возникновения ЭСР. Значения переходных токов в этих ветвях, не превышающие величины в 1-2 % от величины ЭСР, считаются незначительными, так как электромагнитные помехи от таких переходных токов оказывают слишком слабое

влияние на бортовую радиоэлектронную аппаратуру КА. Это позволяет не учитывать величины переходных токов в указанных областях, построить ограниченную область расчета растекания токов и проводить ускоренные расчеты растекания токов от электростатического разряда по поверхности космического аппарата.

В проведенном исследовании решена задача ускоренного приближенного расчета эквивалентных схем плоскости. В дальнейших исследованиях планируется применять метод для расчетов растекания токов по поверхности КА, состоящего из более сложных геометрических элементов конструкции.

Предложен новый подход к макромоделированию эквивалентных схем большой размерности для крупногабаритных космических аппаратов повышенной сложности, базирующийся на явном и неявном численных методах Эйлера. Построена макромодель и получена новая вычислительная схема, в которой вычисляются только коэффициенты соответствующего вектора. Новая вычислительная схема позволяет на несколько порядков сократить вычислительные затраты на анализ СЭМ КА.

Предложен ряд этапов расчета на ЭВМ наводок во фрагментах бортовой кабельной сети космического аппарата с помощью построения макромоделей по предложенной вычислительной схеме с использованием методов Эйлера. Это преобразование файла схемы космического аппарата в матричный вид, формирование модели схемы в РОКБ, построение макромодели СЭМ КА на основе явного и неявного методов Эйлера, расчет вектора фазовых переменных по макромоделям, вывод вектора фазовых переменных, построение картины растекания токов по поверхности КА, и, наконец, вычисление величины наводки в кабеле на основе картины растекания токов и коэффициенте трансформации тока протекающего по элементу КА в напряжение наводки.

4 Заключение

Развита теория проектирования электронных средств повышенной функциональной надежности, стойких к деструктивным электромагнитным воздействиям, в том числе в виде мощных электромагнитных импульсов, основанная на разработанной методике моделирования воздействия электростатического разряда (ЭСР) на электронные средства. Разработана и исследована модель одного из базовых встроенных элементов защиты КМОП микросхем – GGNMOST. Определены параметры, которыми должна обладать встроенная схема защиты, чтобы обеспечить два уровня защиты – конструкторский и схемотехнический.

Даны рекомендации разработчику аппаратуры по построению обобщенной модели микросхемы со встроенной защитой. У конкретных микросхем с элементом защиты GGNMOST параметры этого элемента защиты могут отличаться. Поэтому сначала надо составить модель элемента защиты, соответствующую элементу защиты конкретной микросхемы. Для этого нужно получить ВАХ и АЧХ модели, аналогичные реальному элементу. Затем должен быть произведен выбор компромиссного решения по параметрам пассивных компонентов. После того, как модель элемента защиты составлена, в зависимости о топологии интегральной микросхемы, выходы схемы защиты соединяются с конкретными входами модели цифровой микросхемы. Полученная модель будет довольно точно отражать работу цифровой микросхемы со встроенной защитой.

Даны рекомендации по применению схемы защиты. Схема защиты должна защищать каждый вход цифровой микросхемы. Причем схема защиты должна располагаться как можно ближе к выводам микросхемы, которые схема защиты защищает. Лучше всего схему защиты использовать не виде отдельного устройства, а размещать во время проектирования платы участки печатного монтажа, где будет располагаться эта схема. Также она должна располагаться между микросхемой и интерфейсными выводами устройства, через которые может идти помеха. Так как схема защиты состоит из 6 компонентов, есть ограничения по размеру микросхем, которые она может защищать. Но, в любом случае, схема защиты должна иметь максимально плотную компоновку, иметь минимальную длину печатных проводников в схеме и занимать как можно меньше места на плате. При встроенном в плату исполнении можно использовать двусторонний монтаж, что даст наибольшую экономию места на плате.

Проведен анализ методов оценки надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (БРЭА КА) и возможность их применения с учетом особенностей схем расчета надежности БРЭА КА. Разработаны методы расчета электронных модулей БРЭА КА, позволяющие учитывать влияние ЭСР на их надежность. Разработаны методы имитационного моделирования БРЭА КА, позволяющие оценить показатели надежности структурно-сложной БРЭА и БРЭА с реконфигурируемой структурой, позволяющие в совокупности повысить точность и достоверность расчетной оценки надежности БРЭА КА.

В плане разработки макромоделей и метода приближенного расчета эквивалентных схем большой размерности для крупногабаритных космических аппаратов (КА) повышенной сложности предложен метод выделенных областей, в основе которого лежит проведение расчетов переходных токов лишь в локальной зоне схемы космического аппарата. Проведенные эксперименты в программе «Satellite-MIEM» показывают, что область, в которой значения переходных токов в ветвях не больше величины в 1-2 % от величины электростатического разряда (ЭСР), представляет собой 400 узлов вокруг места возникновения ЭСР. Значения переходных токов в этих ветвях, не превышающие величины в 1-2 % от величины ЭСР, считаются незначительными, так как электромагнитные помехи от таких переходных токов оказывают слишком слабое влияние на бортовую радиоэлектронную аппаратуру КА. Это позволяет не учитывать величины переходных токов в указанных областях, построить ограниченную область расчета растекания токов и проводить ускоренные расчеты растекания токов от электростатического разряда по поверхности космического аппарата.

В проведенном исследовании решена задача ускоренного приближенного расчета эквивалентных схем плоскости. В дальнейших исследованиях планируется применять метод для расчетов растекания токов по поверхности КА, состоящего из более сложных геометрических элементов конструкции.

Предложен новый подход к макромоделированию эквивалентных схем большой размерности для крупногабаритных космических аппаратов повышенной сложности, базирующийся на явном и неявном численных методах Эйлера. Построена макромодель и получена новая вычислительная схема, в которой вычисляются только коэффициенты соответствующего вектора. Новая вычислительная схема позволяет на несколько порядков сократить вычислительные затраты на анализ СЭМ КА.

Предложен ряд этапов расчета на ЭВМ наводок во фрагментах бортовой кабельной сети космического аппарата с помощью построения макромоделей по предложенной

вычислительной схеме с использованием методов Эйлера. Это преобразование файла схемы космического аппарата в матричный вид, формирование модели схемы в РОКБ, построение макромодели СЭМ КА на основе явного и неявного методов Эйлера, расчет вектора фазовых переменных по макромоделям, вывод вектора фазовых переменных, построение картины растекания токов по поверхности КА, и, наконец, вычисление величины наводки в кабеле на основе картины растекания токов и коэффициенте трансформации тока протекающего по элементу КА в напряжение наводки.

Планируется внедрение разработанной структурно-электрофизической модели крупногабаритного космического аппарата повышенной сложности на предприятии ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Литература

- 1. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М.: Издательский дом «Технологии», 2005. 352 с.
- 2. Балюк Н. В., Кечиев Л. Н., Степанов П. В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М.: ООО «Группа ИДТ», 2008.-478 с.
- Галухин И. А. «Исследование устойчивости ТТЛ- и КМОП-структур к ЭСР». Научно-техническая конференция МИЭМ. Тезисы докладов. — М.~: МИЭМ, 2011. — с. 260-262.
- Горлов М., Строгонов А., Адамян А.. Воздействие электростатических разрядов на полупроводниковые изделия. «ChipNews» 2001, № 1. http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200101/34.html
- Горлов М., Строгонов А., Адамян А.. Воздействие электростатических разрядов на полупроводниковые изделия. Часть 2. «ChipNews» 2001, № 2. http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200102/9.html
- 6. Горлов М., Строгонов А., Адамян А.. Воздействие электростатических разрядов на полупроводниковые изделия. Часть 3. «Компоненты и технологии» 2008, № 3
- 7. Волков С., Ефишин А., Морозов С., Соколов С.. Проблема электростатического разряда и современные методы защиты интегральных схем от него. Часть 1. «ChipNews» 2003, № 7. http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200307/8.html
- 8. Волков С., Ефишин А., Морозов С., Соколов С.. Проблема электростатического разряда и современные методы защиты интегральный схем от него. Часть 3 «ChipNews» 2005, № 2.
- 9. С. Волков, А. Ефишин, С. Морозов, С. Соколов. Проблема электростатического разряда и современные методы защиты интегральный схем от него. Часть 4 «ChipNews» 2008, № 1.
- 10. Tom Diep and Charvaka Durvury. Electrostatic Discharge (ESD), Application Report, SSYA010 January 2001.
- 11. HCMOS Design Considerations, SCLA007A, September 2002.
- 12. Абрамешин А.Е., Галухин И.А., Кечиев Л.Н., Кузнецов В.В., Назаров Р.В.. Воздействие ЭСР на полупроводниковые компоненты: моделирование схем защиты, методов и средств испытаний. Технологии ЭМС. 2012. № 3(42). С. 44–58.

- 13. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 464 с.
- 14. Дворников О., Шульгевич Ю. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 1. Расчёт Spice параметров биполярных транзисторов с использованием конструктивно технологических и электрофизических параметров. СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, № 5, 2009, 48-53.
- 15. Компания NXP http://www.ru.nxp.com/
- 16. BFG67; BFG67/X; BFG67/XR NPN 8 GHz wideband transistors, Rev. 05 23 November 2007. Product data sheet.
- 17. MAX9691/MAX9692/MAX9693 Single/Dual, Ultra-Fast, ECL-Output Comparators with Latch Enable. Product data sheet.
- 18. 74F02 Quad 2-input NOR gate. Product data sheet.
- 19. Рынок микроэлектроники. Ждущий мультивибратор. http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/funop_14_1_2.htm
- 20. Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Электронный учебник по курсу компьютерная электроника. http://www.khaer.com.ua/downloads/ke/rus/tema1/1.8.htm
- 21. MIL-STD-883H «TEST METHOD STANDARD MICROCIRCUITS» or 26.02.2010
- 22. ГОСТ Р 51317.4.2 99 Совместимость технических средств электромагнитная «Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний».
- 23. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Издательский дом «Технологии», 2003 г. 540 с.
- 24. Шило В. Л. Популярные цифровые микросхемы: справочник. 2-е изд., испр. Челябинск: Металлургия, 1989. 352 с.
- 25. Шило В. Л. Популярные микросхемы КМОП: справочник. М.: Ягуар, 1993. 63 с.
- 26. Гальперин М. В. Электронная техника: учебник для студентов. М.: Издательский дом «Форум», 2007. 351 с.
- 27. А. Уваров. Особенности конструирования на цифровых ИМС. «Радиомир», 2003, № 3, с. 23-24.
- 28. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: Пер. с нем./ И. П. Кужекин. М.: Энергоатомиздат, 1995. 304 с.

- 29. Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. проф. Л.С. Новикова. М.: КДУ, 2007. 1144 с.
- 30. J.-P. Catani, D. Payan. Electrostatic behaviour of materials in a charging space environment. Proceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment. Noordwijk, The Netherlands, 16-20 June 2003 (ESA SP-540, September 2003).
- 31. Бабкин Г.В., Борисов Н.И., Марченков К.В., Саенко В.С., Соколов А.Б. Разработка алгоритма формирования структурной электрофизической модели космического аппарата на основе электрических схем, состоящих из фазовых параметрических макромоделей // Космонавтика и ракетостроение. Москва, ЦНИИмаш. Вып. 3(52). —2008. С.161—174.
- 32. Комягин С.И., Соколов А. Б. Требования по стойкости радиоэлектронной аппаратуры летательных аппаратов в условиях воздействия электростатических разрядов // Технологии электромагнитной совместимости. Москва, изд-во ООО «Издательский Дом «Технологии». —2008. № 2(25). С. 3—8.
- 33. Шалумов А.С., Кофанов Ю.Н., Малютин Н.В., Способ Д.А., Жаднов В.В., Носков В.Н., Ваченко А.С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Том 1. М.: «Энергоатомиздат», 2007. 538 с.
- 34. Жаднов В.В., Полесский С.Н., Мальгин Ю.В., Якубов С.Э., Соколов А.Б. База данных по характеристикам надежности и качества электронновычислительных средств и комплектующих // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2008620402 от 07 ноября 2008 года. Москва. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
- 35. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
- 36. ОСТ-4Г0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности.
- 37. Справочник «Надежность ЭРИ» М.: МО РФ, 2006.
- 38. Справочник «Надежность ЭРИ ИП» М.: МО РФ, 2006.

- 39. ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.
- 40. Жаднов В.В., Сарафанов А.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств. М.: Солон-Пресс, 2012. 464 с.
- 41. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Полесский С.Н. Информационная технология обеспечения надежности электронных средств наземно-космических систем: научное издание. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2012. 565 с.
- 42. MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment. USA: DoD, 1991.
- 43. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Жаднов И.В. Расчетная оценка надежности электронных модулей аппаратуры космических аппаратов. / Технологии ЭМС, № 1 (40), 2012. с. 29-33.
- 44. Жаднов В.В. Информационные технологии в прогнозировании надежности электронных средств. / Информационные технологии в проектировании и производстве, № 1, 2012. с. 20-25.
- 45. РД 134-0139-2005. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам.
- 46. ОСТ 134-1034-2003. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.
- 47. Жаднов В.В., Абрамешин А.Е. Информационная технология обеспечения надежности электронных средств наземно-космических систем. / Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств: сб. науч. тр. // Под ред. Л.Н. Кечиева. М.: МИЭМ, 2012. с 5-12.
- 48. ОСТ-4Г0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности.
- 49. Жаднов В.В., Полесский С.Н., Тихменев А.Н. Современные подходы к исследованию безотказности электронных средств циклического применения. / Надежность и качество-2012: труды Международного симпозиума: в 2-х т. // Под ред. Н. К. Юркова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2012 1 т. с. 70-74.
- 50. РМ 25 446-87. Изделия приборостроения. Методика расчета показателей безотказности.

- 51. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
- 52. РДВ 319.01.19-98. Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП. Garrett H.B. The Charging of Spacecraft Surfaces / Review of Geophysics and Space Physics. 1981. V. 19. № 4. P. 577-616.
- 53. Акишин А.И., Новиков Л.С. Физические процессы на поверхности искусственных спутников Земли. М.: Изд-во МГУ, 1987.
- 54. Милеев В. Н. , Новиков Л. С. В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике солнца. Вып.86. М.: Наука, 1989, с. 64 98.
- 55. Акишин А.И., Новиков Л.С. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. М.: Знание, Космонавтика, астрономия, 1983, № 4, 64 с.
- 56. Попов Г.В., Бабкин Г.В., Дегтярев В.И., Пахомов В.А., Флоридов А.А., Кутявин В.А., Графодатский О.С., Морозов Е.П., Скрябышева И.Ю. Геофизическое прогнозирование уровня радиационной электризации космических аппаратов в орбитальных условиях. Руководство для конструкторов. Под ред. Попова Г.В., Бабкина Г.В. Калининград. М. О.: ЦНИИМАШ. 1993. 72 с.
- 57. Purvis C.K., Garrett H.B., Whittlesey A.C., Stevens N.J. Desing Guidelines for Asserssing and Controlling Spacecraft Charging Effects, NASA-TR-2361. 1984. Per № 04509243 (Перевод № 21-86. 1986).
- 58. Gaines E.E., Nightingale R.W., Jmhof W.L. and Reagan J.B. Enhanced Radiation Doses to High-Altitude Spacecraft During June 1980 // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1981. V. NS-23. № 6. P. 4502-4504.
- 59. Тютнев А. П. , Ванников А. В. , Мингалеев Г. С. Радиационная электрофизика органических диэлектриков. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 60. Доронин А.Н., Тютнев А.П., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д. Проводимость внешних диэлектрических покрытий космических аппаратов при воздействии космических ионизирующих излучений // Перспективные материалы, 2001, № 2, с. 15 22.
- 61. Mitigating in-Space Charging Effects A Guideline. NASA –HDBK 4002 A. March 2011. 181 p.
- 62. Пожидаев Е.Д., Саенко В.С. Смирнов И.А., Бабкин Г.В., Морозов Е.П., Тютнев А.О., Флоридов А.А., Доронин А.Н. Повышение стойкости космических

- аппаратов к воздействию поражающих факторов электризации // Космонавтика и ракетостроение с. 32-35.
- 63. Безродных И.П.,. Морозова Е.И., Петрукович А.А., Казанцев С.Г., Семёнов В.Т. Радиационные условия на геостационарной орбите // Вопросы электромеханики, 2010. Т.117, с.33-42.
- 64. Безродных И.П., Казанцев С.Г., Семёнов В.Т. Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. .Труды НПП ВНИИЭМ. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. Т.116,с.23-26.
- 65. Гецелев И.В., Подзолко И.В., Безродных И.П., Семёнов В.Т., Фадеев В.М., Ходченко В.П. Влияние ионизирующих излучений на КА «Метеор-М» № 1 // Вопросы электромеханики т.112, 2009, с. 29-34.
- 66. Артемов М.Е. Радиационные условия при полете космических аппаратов по сложным эволюционирующим орбитам в радиационных поясах земли. <u>Полет.</u> Общероссийский научно-технический журнал. 2010. № 8. С. 22-25.
- 67. Архангельская И.В. Сравнительный анализ радиационных условий на околоземных орбитах с различными параметрами/И.В. Архангельская, А.И. Архангельский, А.М. Гальпер // Научная сессия МИФИ 2010. Сборник научных трудов. М.:МИФИ, 2010. Т.4:Физика ядра и частиц. Астрофизика и космофизика. Квантовая электроника. С.144-148
- 68. Акишин А.И., Новиков Л.С. Космическое материаловедение. Энциклопедия Московского Университета. НИИЯФ им. Д.В. Скобельцина. М.: Изд-во Моск. унта, 2005, c.55-64.
- 69. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Васильев С.С., Вернов С.Н.. Николаев В.С., Теплов И.Б. Моделирование воздействия космической среды на элементы космических аппаратов // Proc. XYII Congr. YAF, Noth. Holl. Publ. Co, 1968, p.279-291
- 70. Акишин А.И. Развитие космического материаловедения в НИИЯФ МГУ // Доклады на заседаниях Учёного Совета НИИЯФ и ОЯФ физического факультета МГУ в 1995-1997 гг. М.: Изд-во МГУ, 1997. С. 87-234
- 71. Стародубцев В.А. Радиационная электризация диэлектрических материалов // Известия Томского политехнического университета, 2000 № 300(3), с. 22-31.

- 72. Стародубцев В.А., Фёдоров Б.В., Изменение напряженности внешнего электрического поля фосфатных стёкол, заряженных потоком электронов // Изв. Вузов СССР, 1976, № 9, с.132-133.
- 73. Акишин А.И., Новиков П.С. Электризация космических аппаратов. М. : Знание, сер. Космонавтика, астрономия, 1985, № 6, 73 с.
- 74. Акишин А.И. Эмиссионные процессы при электрическом пробое радиационно-заряженных диэлектриков // ФХОМ, 1998, № 5, с. 27-30
- 75. Акишин А.И. Фрактальный характер явлений при электрическом пробое радиационно-заряженных диэлектриков // ФХОМ, 1997, № 3, с. 17-21
- 76. Новиков Л.С., Бабкин Г.В., Морозов Е.П. Колесов С.А., Крупников К.К., Милеев В.Н., Саенко В.С. Комплексная методология определения параметров электростатической зарядки, электрических полей и пробоев на космических аппаратах в условиях их радиационной электризации. Руководство для конструкторов. М.: Изд-во ЦНИИмаш, 1995. 160 с.
- 77. Frederickson A.R. (1974) Radiation Induced Electrical Current and Voltage in Dielectric Structures. AFRL-TR-74 0583, 41 p.
- 78. Frederickson A. R (1983). «Electric Discharge Pulses in Irradiated Solid Dielectric in Space» // IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 18, pp, 337-349
- 79. Frederickson A.R., Cotts D.B., Wall J.A., Bouquet F.L. (1986) Spacecraft Dielectric Material Properties and Spacecraft Charging» AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics. Vol. 107, pp. 95-100.
- 80. Frederickson A..R., Holeman E.G., Mullen E.G. (1992). «Characteristics of Spontaneous Electrical Discharging of Various Insulators in Space Radiations» //IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 39 n. 6. pp. 1773-1782.
- 81. Frederickson A.R., Mullen E.G., Brautigam D.H., Kerns K.J., Robinson P.A., Holeman E.G. (1991) Radiation-induced Insulator Pulses in the CRRES Internal Discharge Monitor Satellite Experiment // IEEE Transactions on Nuclear Science. v. 38, pp. 1614-1621.
- 82. Бабкин Г.В., Вахниченко В.В. Иванов В.А., Левицкий Ю.Е., Лукъященко В.И., Морозов Е.М. Антистатическая защита отечественных космических аппаратов. Состояние проблемы и перспектива её решения // Космонавтика и ракетостроение, 2003. вып.1 (30) с. 5-14
- 83. Avoiding Problems Caused by Spacecraft On-Orbit Internal Charging Effects/NASA HDBK 4002, Febr 17 1999. 51 p.

- 84. Green N.W., Frederickson F.R., Dennison J.R. (2006) Experimentally Derived Resistivity for Dielectric Samples from the CRRES Internal Discharge Monitor // IEEE Transactions on Plasma Science. Vol. 34 № 5, pp./1973-1978.
- 85. Bodeau M. High Energy Electron Climatology that Supports Deep Charging Risk Assessment in GEO // AIAA 2010-1608 48th AIAA Aerospace Science Meeting, 2010, Orlando FL. 13 p.
- 86. Бабкин Г.В., Иванов В.А., Морозов Е.П. Проблемные вопросы взаимодействия космической плазмы с космическим аппаратом при решении задачи повышения устойчивости его бортовых систем к негативным эффектам электростатической зарядки //Космонавтика и ракетостроение, 2004. вып.1 (34) с.92-104.
- 87. Тютнев А.П., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д. Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений. М.: Наука, 2005, 453 с.
- 88. Gross B., Dow J., Nablo S.V. Charge buildup in electron-irradiated dielectrics // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. № 6. P. 2459-2463.
- 89. Gross B., Sessler G.M., West J.E. Charge dynamics for electron-irradiated polymer-foil electrets // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. № 7. P. 2841-2851.
- 90. Тютнев А.П., Ванников А.В., Мингалеев Г.С., Саенко В.С. Электрические явления при облучении полимеров. М.: Энергоатомиздат, 1985. 176 с.
- 91. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики. М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
- 92. Spacecraft Charging Technology Conf. Eds. N.J. Stevens and C.P. Pike. NASA Conf. Publ. 2182 / AFGL TR 81 0270. 1979.
- 93. Spacecraft charging technology. NASA Conf. Publ. 2182. NASA, 1981.
- 94. Meulenberg A Evidence for a new discharge mechanism for dielectrics in a plasma In: Spacecraft charging by magnetospheric plasmas. Ed. A. Rogen. Progress in Astronautics and Aeronautics. 1976. V. 47. P. 237.
- 95. Ягушкин Н.И., Графодатский О.С., Исляев Ш.Н., Сергеев А.И., Смекалин Л.Ф. Радиационно-электрические явления в диэлектрических материалах космических аппаратов при электризации В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Вып. 86. М.: Наука. 1989. с. 131-168.
- 96. Ягушкин Н.И., Сергеев А.И., Гостищев Э.А. Исследование радиационно-электрических процессов в диэлектриках при облучении электронами с энергией до

- 100 кэВ // В кн.: Модель космоса. Т. 2. Под. ред. проф. Л.С. Новикова. М.: КДУ. 2007. С. 343–360.
- 97. Tyutnev A.P., Tarasov V.N., Karpechin A.I., Saenko V.S., Khodnenko V.P., Pozhidaev E.D., Babkin G.V. Electron charging of metallized fabrics for spacecraft thermal blankets Proc. 6th Int. Symp. on Materialals in a Space Environment. ESTEC. Noordwijk. 1994. pp.341-348.
- 98. Tyutnev A.P., Khodnenko V.P., Sadovnichii D.N., Yushkov E.S., Novikov L.S. The nature of electrostatic discharges as studied during preflight laboratory testing of Electro spacecraft Proc. 7th Int. Symp. on Materialals in a Space Environment. ESTEC. Toulouse. 1997. pp.101-106.
- 99. Marque J.P. Phenomenology of e-irradiated polymer breakdown // Vacuum. 1989. V. 39. N. 5. P. 443-452.
- 100. Тютнев А.П., Саенко В.С., Смирнов И.А., Пожидаев Е.Д. Радиационная электропроводность полимеров при длительном облучении // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 5. С. 364-375.
- 101. Lackner H., Kohlberg I., Nablo S.V. Production of large electric fields in dielectrics by electron injection // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. № 6. P. 2064-2065.
- 102. Catani J.-P. Payan D. Electrostatic behavior of materials in a charging space environment // Proc. 9th Int. Symp. On Materials in a Space Environment. ESA SP-540. p. 3-16.
- 103. Антонов В.М., Пономаренко А.Г., Графодатский О.С., Исляев Ш.Н. Исследование электризации моделей космических аппаратов в лабораторных условиях В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике солнца. Вып.86. М.: Наука, 1989. с. 45-63.
- 104. Доронин А.Н., Тютнев А.П., Саенко В.С, Пожидаев Проводимость внешних диэлектрических покрытий космических аппаратов при воздействии космических ионизирующих излучений // Перспективные материалы. 2001. № 2. С. 15-21.

105.

106. Л.С. Новиков, Г.В. Бабкин, Е.П. Морозов, С.А. Колосов, К.К. Крупников, В.Н. Милеев, В.С. Саенко — Комплексная методология определения параметров электростатической зарядки, электрических полей и пробоев на космических аппаратах в условиях радиационной электризации. Руководство для конструкторов. - ЦНИИмаш, 1995.

- 107. А.С. Измайлов, А.Н. Дорофеев, В.С. Саенко, А.П. Тютнев, Е.Д. Пожидаев, В.Т. Семенов Структурная электрофизическая модель электризации космических аппаратов. М.: Труды ВНИИЭМ, Т. 102, 2005, с. 210-219
- 108. К.В. Марченков, А.Н. Дорофеев, А.В. Востриков, В.С. Саенко Новое поколение программного обеспечения «Satellite-MIEM» для расчета наводок во фрагментах бортовой кабельной сети, проложенных по внешней поверхности космических аппаратов. Труды XVII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела», 30 июня 5 июля 2007 г. Севастополь, с. 421-425.
- 109. Марченков К.В., Соколов А.Б., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д. Новое поколение программного обеспечения «Satellite-MIEM» для расчета наводок во фрагментах бортовой кабельной сети, проложенных по внешней поверхности космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. Москва, изд-во ООО «Издательский Дом «Технологии». − 2008. № 1(24), С. 39-44. De Forest S.E., Mc. Jlwain G.E. Plasma clouds in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. Pp 3587-3611.
- 110. Inouye G.T. Spacecraft charging by magnetospheric plasmas // Progr. Astronaut. Aeronaut. MII Press. 1976. V. 42. P. 103-120.
- 111. Nanevicz J.E., Adamo R.C. Malter discharges as a possible mechanism resonsible for noise pulses observed on synchronous-orbit satellites // Progress in Astronautics and Aeronautics. 1976. V. 47. P. 247-261.
- 112. Garrett H.B. The Charging of Spacecraft Surfaces / Review of Geophysics and Space Physics. 1981. V. 19. № 4. P. 577-616.
- 113. Тютнев А.П., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д., Сасов А.М. Моделирование электрических явлений, сопровождающих воздействие низкоэнергетической компоненты космических ионизирующих излучений // Конструирование научной космической аппаратуры. М.: Наука, 1982. С.66-80.
- 114. Новиков Л.С., Бабкин Г.В., Морозов Е.П., Колосов С.А., Крупников К.К., Милеев В.Н., Саенко В.С. Комплексная методология определения параметров электростатической зарядки, электрических полей и пробоев на космических аппаратах в условиях радиационной электризации. Руководство для конструкторов. ЦНИИмаш, 1995. 160 с.
- 115. Соколов А.Б. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов. Дисс. доктора техн. наук. М.: МИЭМ (ТУ) 2009

- 116. Марченков К.В., Соколов А.Б., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д. Новое поколение программного обеспечения «Satellite-MIEM» для расчета наводок во фрагментах бортовой кабельной сети, проложенных по внешней поверхности космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. Москва, изд-во ООО «Издательский Дом «Технологии». − 2008. № 1(24), С. 39-44.
- 117. Марченков К.В., Дорофеев А.Н., Востриков А.В., Саенко В.С. Новое поколение программного обеспечения «Satellite-MIEM» для расчета наводок во фрагментах бортовой кабельной сети, проложенных по внешней поверхности космических аппаратов. Труды XVII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела», 30 июня 5 июля 2007 г. Севастополь. С. 421-425.
- 118. Агапов В.В. «Испытательный стенд для определения помех от электростатических разрядов в кабелях космических аппаратов», Технологии ЭМС №2 (29), М.: Изд-во «Технологии», 2009. стр. 72-75.
- 119. Востриков А.В. Приближенный метод расчета растекания токов по элементам конструкции космического аппарата при электростатических разрядах. Технологии ЭМС №2(33). Москва 2010, с. 75-79.
- 120. Востриков А.В., Борисов Н.И. Новый алгоритм построения макромоделей на основе методов Эйлера. Труды XXI Международного совещания «Радиационная физика твердого тела», 22 августа 27 августа 2011 г. Севастополь, с. 283-291.