

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

На правах рукописи

Белик Глеб Андреевич

**Метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА
космических аппаратов к возникновению ЭСР**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор Саенко Владимир Степанович

Москва, 2013

Содержание

Введение	4
Глава 1 Объёмная электризация космических аппаратов: история исследований и современное состояние разработок.....	10
1.1 Общие проблемы электризации КА	10
1.2 Влияние околоземной космической «погоды» на электризацию КА...16	
1.3 Внутренняя электризация космических аппаратов	26
1.4 Меры борьбы с поражающими факторами электризации	41
Глава 2 Схемотехническое моделирование воздействия материала с заданными свойствами на работу типового электронного устройства – мультивибратора	50
2.1 Расчетно-теоретическая модель	52
2.2 Экспериментальное получение исходных данных для расчетно-теоретической модели	56
Глава 3 Технология изготовления модельного диэлектрика (нанопроводящего материала) и исследование его электрофизических свойств	63
3.1 Электропроводящие полимеры	63
3.2 Проводящие компоненты.....	63
3.2.1 Технический углерод (сажа)	65
3.2.2 Наполнители для получения высокой проводимости	67
3.2.3 Связующие компоненты	67
3.3 Свойства наполненных полимеров	69
3.4 Исходные компоненты для изготовления модельного диэлектрика 71	
3.4.1 Диэлектрик парафин нефтяной	71
3.4.2 Проводящий наполнитель технический углерод	74
3.5 Отработка технологии изготовления композитного диэлектрического материала	76
3.5.1 Образец для проведения измерений	77
3.5.2 Измерения тангенса угла наклона и емкости образца	78

3.5.3 Измерение проводимости образца	83
Глава 4 Методика исследования полученного модельного диэлектрика на электризуемость	85
4.1 Образцы для проведения исследований.....	86
4.2 Установка для исследований	87
4.3 Исследовательская ячейка для испытаний в установке на электризуемость	88
4.4 Исследование материалов путем их облучения моноэнергетическими потоками	94
4.5 Методика исследований на электризуемость	96
Глава 5 Экспериментальное исследование влияния полученного диэлектрика на параметры печатной платы	98
5.1 Влияние покрытия на частоту генерации прямоугольного сигнала	98
5.2 Измерение скорости передачи данных между двумя ПК используя высокоскоростную сеть передачи данных	100
Заключение	105
Литература.....	108
Приложение А.....	121

Введение

Актуальность темы диссертации. В настоящее время развитие космической техники отечественного производства идёт по линии создания целевых группировок космических аппаратов (КА) различного назначения: для спутниковой связи и телевидения - «Ямал» и «Экспресс-МД», как спутники-ретрансляторы - «Луч», для глобальной системы навигации - «Глонасс-М» и «Глонасс-К». Кроме того, создаются научные серии малых космических аппаратов, космических аппаратов военного назначения и др. важные космические системы. Важнейшим критерием эффективности таких группировок является обеспечение длительных сроков эксплуатации, входящих в них отдельных КА.

В соответствии с этим обстоятельством Федеральным космическим агентством предъявляются требования к конструкторским бюро отрасли по доведению сроков активного существования (САС) создаваемых КА в ближайшее время до 10–15 лет и более. При этом в конструкциях КА произошли существенные изменения, заключающиеся в повсеместном отказе от герметичных отсеков (гермоконтейнеров), имеющих замкнутый объем, который обеспечивал дополнительную защиту бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) от корпускулярных излучений.

Серьезным препятствием для достижения поставленных целей является электризация КА и те негативные процессы, которые она порождает. Это не только дифференциальное зарядение элементов поверхности космического аппарата и объемное зарядение полимерных диэлектриков на его поверхности, но и зарядение бортовой аппаратуры находящейся внутри КА. Экспериментально, в натуральных условиях эксплуатации установлен критерий возникновения электростатического разряда внутри корпуса КА. Это суммарный, за 10 часов флюенс электронов в $2 \cdot 10^{10}$ электронов/см². Такой разряд может вызвать обратимые и необратимые отказы бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Это обусловлено как параметрами разрядных

импульсов (скорость нарастания разрядного тока достигает 10^{10} А/с), так и повышенной чувствительностью аппаратуры к таким воздействиям.

Установлено, что источником опасного воздействия для элементов бортовой электроники служат электростатические разряды в диэлектриках печатных плат или пластмассовых корпусах полупроводниковых приборов. Причем разряд из диэлектрика в кристалл полупроводника микросхемы прибора, как правило, приводит к необратимому отказу последнего.

Вопросам электризации КА, в том числе и внутренней, посвящен целый ряд работ таких авторов как: Л.С. Новиков, А.И. Акишин, В.С. Анашин, Л.Н. Кечиев, В.С. Саенко, В.Ю. Кириллов, А.П. Тютнев, Е.Д. Пожидаев, А.Б. Соколов, В.А. Стародубцев, А. Фредериксон, Г. Гэррэт, М. Бодэ и др.

Поскольку полностью решить проблему проникновения потоков электронов через внешние и внутренние конструкции КА без существенного увеличения массы космического аппарата невозможно, необходимо разработать метод защиты диэлектриков печатных узлов бортовой аппаратуры от внутренней электризации, т.е. предотвратить накопление заряда. Для этого необходимо провести разработку диэлектрика, обладающего пониженной электризуемостью за счет собственной нанопроводимости. Приставка «нано-» здесь указывает только на необходимую величину проводимости 10^{-9} Ом⁻¹·м⁻¹ для исключения ЭСР. Мероприятия по определению возможности применения такого нанопроводящего диэлектрика, в качестве диэлектрика печатных плат позволят повысить устойчивость КА к воздействию факторов электризации, и тем самым увеличить срок их активного существования, **поэтому выбранная тема диссертационной работы является актуальной.**

Цель диссертационной работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы является повышение устойчивости космической бортовой аппаратуры к поражающим факторам внутренней

электризации за счет разработки метода повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к возникновению электростатических разрядов путем применения в печатных узлах диэлектрика, обладающего нанопроводимостью.

Для достижения поставленной цели было необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Выполнить обзор и анализ причин возникновения и существующих методов защиты БРЭА космических аппаратов от процессов внутренней электризации и сопровождающих её электростатических разрядов и сформулировать целевую задачу. На основе анализа этих методов сформулировать новое направление для устранения внутренней электризации БРЭА КА. Это направление предполагает использование в качестве диэлектриков печатных узлов бортовой аппаратуры КА диэлектриков, обладающих нанопроводимостью.

2. Провести компьютерное моделирование работы типового цифрового устройства мультивибратора для обоснования возможности замены традиционных диэлектриков печатного узла на диэлектрики, обладающие нанопроводимостью и исключающие возможность возникновения электростатических разрядов при электронном облучении.

3. Разработать методику и изготовить модельный диэлектрик, обладающий требуемым значением объемной проводимости для исключения возможности возникновения электростатических разрядов при электронном облучении.

4. Разработать методику и выполнить тестовые эксперименты по определению электризуемости модельного диэлектрика под действием электронного облучения в вакууме, в условиях близких к натурным условиям эксплуатации. Запатентовать предложенное в диссертации техническое решение.

5. Разработать методику экспериментальных исследований типового цифрового устройства мультивибратора путем применения модельного

диэлектрика с нанопроводимостью, и провести сравнение с результатами компьютерного моделирования.

6. Разработать метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к ЭСР, выполнить экспериментальную проверку метода, провести оценку влияния повышенной проводимости диэлектрика печатной платы на характеристики БРЭА.

Научная новизна

1. Проведено систематическое изучение методов снижения негативных эффектов внутренней электризации на основе анализа предшествующих исследований данного вопроса. На основе анализа этих методов сформулировано новое направление для устранения внутренней электризации БРЭА КА. Это направление предполагает использование в качестве диэлектриков печатных узлов бортовой аппаратуры КА диэлектриков, обладающих нанопроводимостью.

2. На основе компьютерного моделирования работы типового цифрового устройства - мультивибратора впервые показана принципиальная возможность замены традиционных диэлектриков печатных узлов цифровых схем на диэлектрики, обладающие нанопроводимостью.

3. Разработана методика изготовления модельного диэлектрика с заданным значением удельной объемной проводимости и методика тестирования этого диэлектрика на электризуемость под действием электронного облучения в вакууме, в условиях близких к натурным условиям эксплуатации.

4. Предложена методика и продемонстрированы результаты тестовых экспериментов по применению модельного диэлектрика в типовом устройстве – мультивибраторе, а также доказано отсутствие влияния повышенной проводимости диэлектрика на параметры функционирования этого устройства.

Практическая значимость

1. Разработан метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к ЭСР, выполнена экспериментальная проверка метода и внедрение метода в процесс проектирования и производства бортовой радиоэлектронной аппаратуры космической техники.

2. Разработана оригинальная печатная плата для бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов, стойкая к возникновению электростатических разрядов. Патент на полезную модель RU 114 816 U1 от 10.04.2012. Патент на изобретение «Печатная плата для бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов» RU 2 497 319 C1 от 29.10.2013 года.

3. Предложенный метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к ЭСР используется при проектировании и в виде выдачи адаптированных требований на разработку изделий космической техники в НПО им. С.А. Лавочкина.

На защиту выносятся

1. Метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к ЭСР, основанный на применении диэлектриков обладающих нанопроводимостью взамен используемых в настоящее время.

2. Результаты компьютерного моделирования работы типового цифрового устройства - мультивибратора, в которых впервые показана принципиальная возможность замены традиционных диэлектриков печатных узлов цифровых схем диэлектриками, обладающими нанопроводимостью, а также сравнение полученных результатов с экспериментом и влияние на характеристики мультивибратора повышенной проводимости диэлектрика печатной платы.

3. Методика и результаты тестовых экспериментов по определению электризуемости модельного диэлектрика под действием электронного облучения в вакууме, в условиях близких к натурным условиям

эксплуатации.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в вариантах, адаптированных для выдачи ТЗ на проектирование и разработку печатных узлов БРЭА космической техники в НПО им. С.А. Лавочкина.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- 19-23 Международных совещаниях и конференциях «Радиационная физика твердого тела», г. Севастополь в 2009-2013 г.г.;
- II Всероссийской научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» г. Москва в 2012 г.;
- Научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ в 2010-2013 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в т. ч. 3 статьи (из них 3 статьи в журналах перечня ВАК) и 10 тезисов докладов и материалов конференций по итогам научных совещаний. Получены два патента: патент на полезную модель и патент на изобретение.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы содержащего 106 наименований. Объем работы – 123 с.

Глава 1 Объёмная электризация космических аппаратов: история исследований и современное состояние разработок

1.1 Общие проблемы электризации КА

Как уже отмечалось во введении развитие космической техники отечественного производства идёт по линии создания целевых группировок космических аппаратов (КА) различного назначения: «Ямал» и «Экспресс-МД» для спутниковой связи и телевидения, спутники-ретрансляторы «Луч», глобальной системы навигации «Глонасс-М» и «Глонасс-К», научной серии малых космических аппаратов, космических аппаратов военного назначения и др. важных космических систем. Важнейшим критерием эффективности таких группировок является обеспечение длительных сроков эксплуатации входящих в них отдельных КА.

В соответствии с этим обстоятельством Федеральным космическим агентством к конструкторским бюро отрасли предъявляются требования о доведении сроков активного существования (САС) создаваемых КА в ближайшее время до 10 – 15 лет и более.

Электризация КА, работающих на геостационарной орбите и на высокоэллиптических орбитах, привела к сбоям в работе и отказам систем КА еще в конце 60-х годов прошлого столетия. В то 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 заряджение поверхности космического аппарата. Общее заряджение 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 заряджением элементов поверхности космического аппарата и объемным заряджением полимерных диэлектриков его внешней поверхности. В результате такого заряджения 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 устойчивости 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 удастся, необходимо проводить расчеты перекрестных помех 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 зарядение как неосвещенных, так и освещенных участков поверхностей, включая вопросы численного расчета потенциального рельефа и его изменения во времени, подробно рассмотрены в литературе [1–6].

Зарядение 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 100–300 мкм относительно корпуса достаточно велика ~ 10 пФ/см². Время, необходимое для достижения потенциала поверхности диэлектрика 10 кВ относительно корпуса, в этом случае, превысит 1000 с.

Солнечная засветка приводит к полному разрядению металлических поверхностей, однако, в диэлектрических материалах остаются объемные

заряды. Часто именно этот аспект электризации приводит к возникновению электростатических разрядов.

Согласно [7], мощность дозы высокоэнергетичных частиц на геостационарной орбите (ГСО) составляет в среднем 0,003 Гр/с. Если электропроводность диэлектрика внешней поверхности КА не превышает $10^{-16} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, то напряженность внутреннего электрического поля в диэлектрике окажется выше 10^6 В/см и электрический пробой станет вполне вероятным [8].

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 [9], 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 $0,2 \text{ м}^2$ без металлизации [10]. Углепластиковые конструкции изготавливают по устаревшей технологии, оставляя на поверхности изделий непроводящие наплавы эпоксидной или полиэфирной смолы. Внедрение новых материалов и запрет на использование материалов, непригодных с точки зрения электризуемости, 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.

Отказ от гермоконтейнера дает возможность существенно уменьшить массу КА и более свободно выбирать его конфигурацию. Например, если масса спутника «Глонасс-М» второго поколения составляет 1,5 тонны, то с отказом от гермоконтейнера в спутнике третьего поколения «Глонасс-К» его масса составляет 940 кг, с перспективой уменьшения до 640 кг в следующих КА этой серии. Такими разработками являются продукция РКК «Энергия» - спутники серии «Ямал» на основе универсальной космической платформы, разработки ОАО «ИСС» - космическая платформа серии «Экспресс 1000», использованная на спутнике Глонасс третьего поколения Глонасс-К, проходящего в настоящий момент этап летно-конструкторских испытаний и платформа «Навигатор» - базовый модуль служебных систем, разработанный в ФГУП «НПО им. Лавочкина», первое применение которого произошло на метеоспутнике Электро-Л №1, находящемся в штатной эксплуатации и первом научном аппарате серии Спектр – Спектр-Р (международный проект «Радиоастрон»). На рисунке 1.1 приведена фотография сборки[11] КА Глонасс-К, на которой видно достаточно плотное размещение бортовой аппаратуры и кабельной сети её соединяющей космической платформы Экспресс-1000, фактически защищенную от космического излучения только конструкциями сотовых панелей и ЭВТИ:

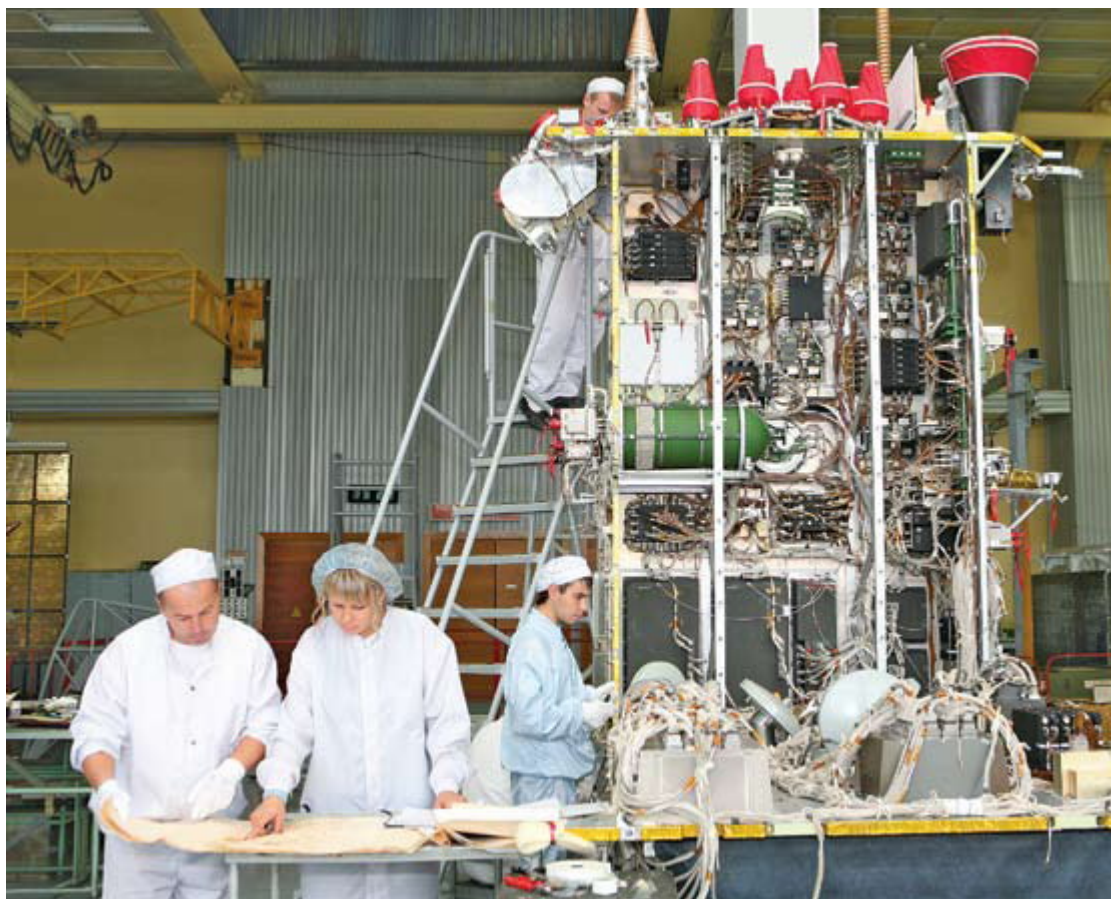


Рисунок 1.1 Сборка КА Глонасс-К1 № 11 (Космос 2471) [11]

Рассмотрим основные факторы внутренней электризации и основные задачи сегодняшнего дня по устранению ее негативных последствий. На рисунке 1.2 приведена довольно удачная схема основных механизмов внутренней электризации, заимствованная из [12].

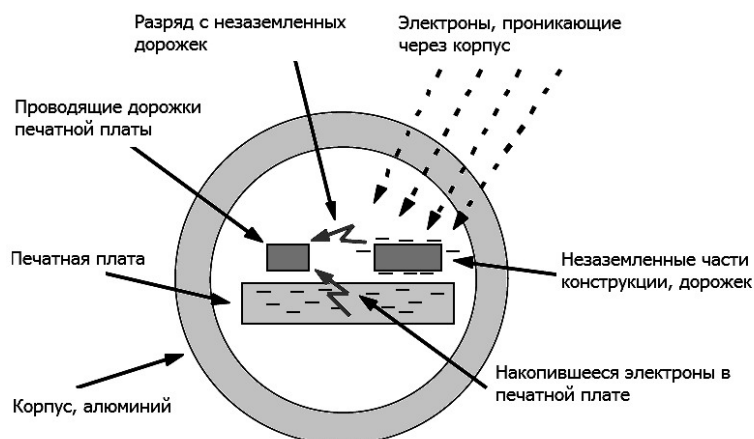


Рис. 1.2 Основные механизмы внутренней электризации [12]

Из приведенной схемы видно, что электроны околоземной космической плазмы могут проникать сквозь корпус КА и накапливаться в диэлектрическом материале печатной платы. При таком заряде диэлектрика печатной платы возможны электростатические разряды непосредственно в токоведущие дорожки этой платы. Это непосредственная угроза активным элементам, распаянным к этим дорожкам.

Поскольку полностью решить проблему проникновения потоков электронов через внешние и внутренние конструкции КА, рассчитать такое взаимодействие и решить эту проблему без существенного увеличения массы космического аппарата невозможно, необходимо применить метод защиты диэлектриков печатных узлов бортовой аппаратуры от внутренней электризации, т.е. накопления заряда. Для этого необходимо использовать диэлектрик, обладающий нанопроводимостью, т.е. проводимость которого превышает $10^{-9} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Термин «нанопроводимость диэлектриков» был заявлен в работе [13] коллектива авторов в 2003 году, и здесь указывает только на величину проводимости. Развитию этой идеи посвящено данное диссертационное исследование.

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 зарядке диэлектрических материалов электронных схем.

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 КА 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) [14]. 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 ($E > 40$ кэВ) порядка 500 000 000 частиц/см²с 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 [14-16]. 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 [14]. Связь интенсивности потоков электронов с солнечным ветром даёт возможность предсказывать изменения космической «погоды», заранее прогнозировать «условия наихудшего случая» для функционирования БРЭА, так как солнечная активность, провоцирующая эти изменения, имеет циклический, повторяющийся 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) [14]. 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 [14]. 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) [17] и НИИЯФ МГУ. Эти модели созданы на основе массива данных, собранных на серии научных спутников в 1960-80ые годы. Аппаратура по изучению окружающей КА радиационной обстановки устанавливается по-прежнему, например IREM (Монитор измерения радиационной обстановки) на КА INTEGRAL, данные которого показывают как пишут авторы [18] качественное, но не количественное, совпадение измерений и модели на рисунке 1.3:

электронов может быть посчитана по несколько модифицированной формуле Фламерсфельда, предложенной авторами в [16]:

$$X = 0,11 \left[\sqrt{1,0 + 22,4EE} + 0,0211 \lg(100E) - 0,999 \right], \text{г/см}^2$$

пробег X , г/см²; энергия электрона E , МэВ

Также глубина проникновения в алюминий (и в некоторые другие материалы) электронов с заданными энергиями может быть посчитана с помощью программного комплекса ESTAR[17]. Пример расчета приводится в [12] и показан на рисунке 1.4:

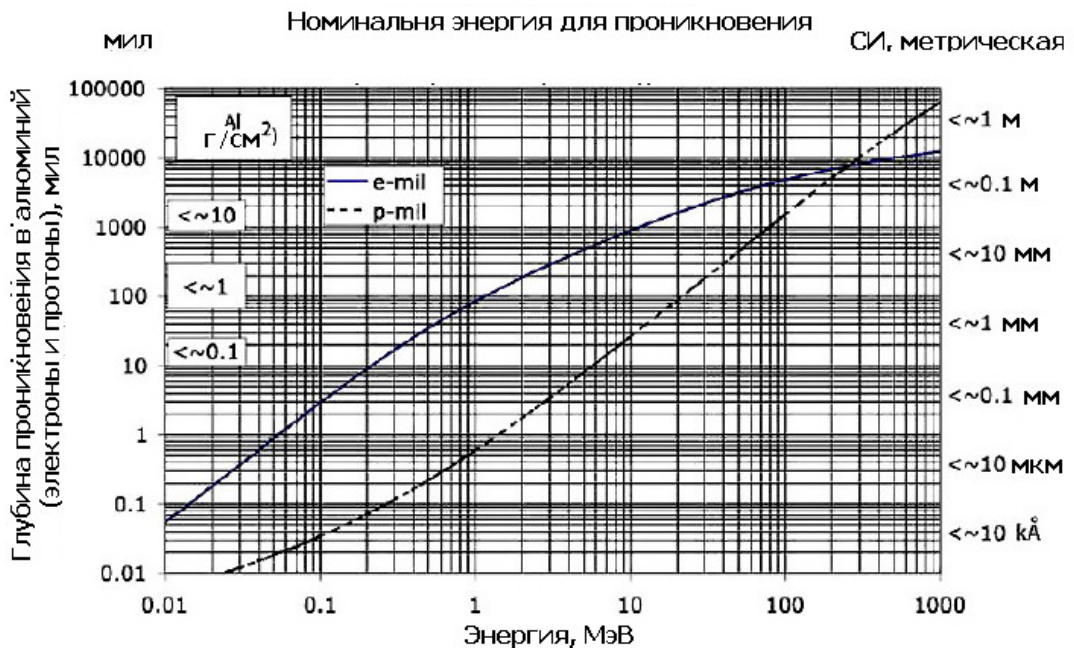


Рисунок 1.4 Зависимость глубины проникновения электронов в алюминий от их энергии. Следует заметить, что эффекты внутренней электризации будут наблюдаться для потоков с энергией больше 100 кВ

Следовательно, суть проблемы состоит в проникновении сквозь элементы конструкции и корпусов микросхем потоков электронов естественных магнитных поясов земли с энергиями от 100 кэВ до 2 МэВ, а также т.н. «электронов-убийц» - немногочисленных частиц с энергиями больше 2МэВ, защиту от которых, как и от высокоэнергетических протонов, в целом предусмотреть невозможно. Их воздействие может привести к критическим отказам.

Для этого необходимо использовать корпуса, с толщиной учитывающей возможность воздействия на них потоков электронов с такой энергией, как например сделано на блоке аппаратуры АРН – вычислителя аппаратуры радионавигации, показанного на рисунке 1.5 [22], усиление защит корпусов микросхем в радиационно-стойком исполнении и обязательная разработка защитных алгоритмов на уровне программного обеспечения – т.е., необходимость разработки логики и архитектуры функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры с учетом отказа ее компонентов на уровне каждой микросхемы, а не только узлов в целом.

Такой подход к решению отказов на алгоритмическом уровне необходим в случае невозможности защитить чувствительные элементы приборов – это, к примеру, ПЗС-линейки звездных датчиков. Единичные частицы, преодолев защитное стекло, вносят искажения в картинку, которая должна быть неподвижной. Пример таких помех можно увидеть в работе [21] Т.В. Кондратьевой о приборе БОКЗ (блок определения координат звездный), посвященной испытаниям приборов для автоматической координации КА по звездам. Эти помехи, вызванные воздействием факторов космического пространства, представлены на рисунке 1.6.



Рисунок 1.5 Корпус блока вычислителя аппаратуры радионавигации [22]



Рисунок 1.6 Кадр, зарегистрированный после солнечной вспышки 14 июля 2000 г. прибором БОКЗ, установленным на геостационарном спутнике «Ямал-100»

В отличие от проблем, вызываемых протонами и решаемых в разделе прикладной науки посвященной радиационно-стойким материалам, внутренняя электризация вызывается электронами. Как отмечено в статье [14], на геостационарной орбите основным источником являются электроны ЕРПЗ и их тормозное излучение. Существенный вклад в «климат» на такой орбите осуществляют потоки частиц солнечных космических лучей (СКЛ). При этом необходимо учитывать и влияние потоков галактических космических лучей (ГКЛ). В тоже время, по мнению авторов, «алюминиевая пластинка толщиной $0,01 \text{ г/см}^2$ практически полностью поглощает все протоны ЕРПЗ на ГСО. По этой причине, также как и на орбите КА ГЛОНАСС, потоками протонов ЕРПЗ можно полностью пренебречь» [14]

Уменьшают риск объёмной электризации в результате воздействия потока электронов экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ). Наружный материал ЭВТИ «непосредственно взаимодействует с космической плазмой и подвергается воздействию интенсивных потоков высокоэнергичных электронов ЕРПЗ. Это может привести к образованию объёмного электрического заряда внутри диэлектрического материала». А это в свою очередь нередко приводит к электрическим разрядам. Электромагнитное излучение, сопутствующее разрядам может вывести из строя бортовое электронное оборудование. Предотвратить такой ход события может металлизация поверхности диэлектрического материала. «Слой металлизации толщиной порядка $0,1 \text{ мкм}$ обеспечивает сток объёмных электрических зарядов из полимерной плёнки на корпус КА. Сток зарядов обеспечивается за счёт радиационной электропроводности полимера» [15] Под радиационной электропроводностью понимают разность между суммарной измеренной электропроводностью при наличии ионизирующих излучений и исходной электропроводностью полимерного слоя. «Следует отметить, что сильное влияние на уровень электризации оказывают нелинейные свойства радиационной электропроводности полимерного слоя» [15] В заключение своей статьи авторы ещё раз подчёркивают роль

скорости солнечного ветра для активации электронов ЕРПЗ. Скорость солнечного ветра может достигать 400 км/сек и выше (400 км/сек – 1 млн. 440 тысяч км/час) Для успешной защиты бортовой электронной аппаратуры авторы советуют учитывать все факторы космических излучений. Подводит итог исследованиям радиационной электропроводности при воздействии на КА обзорная статья коллектива ВНИИЭМ [68]

Постоянное наблюдение за «космической погодой» продолжается и по настоящий момент. За это отвечают спектрометры - измерители потоков электронов разных энергий, размещаемые на научных, метеорологических и спутниках связи. Это как метеоспутники системы GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite - геостационарный спутник наблюдения окружающей среды) – в настоящий момент это GOES 13 и 15, данные с которых доступны для всех исследователей в режиме реального времени [24] для обработки, сравнения потоков [34] и необходимых выводов для корректировки работы КА на орбите. Такие же измерения проходят на КА Электро-Л при помощи аппаратуры СКЛ разработки ИКИ РАН [25,26] и эксперимент Плазма-Ф на космической обсерватории Радиоастрон – КА Спектр-Р, данные с которых также доступны как в виде массивов значений на серверах НИИЯФ МГУ в сети интернет, так и в графическом виде как на рисунке 1.7, на сайте Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова [26].

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.

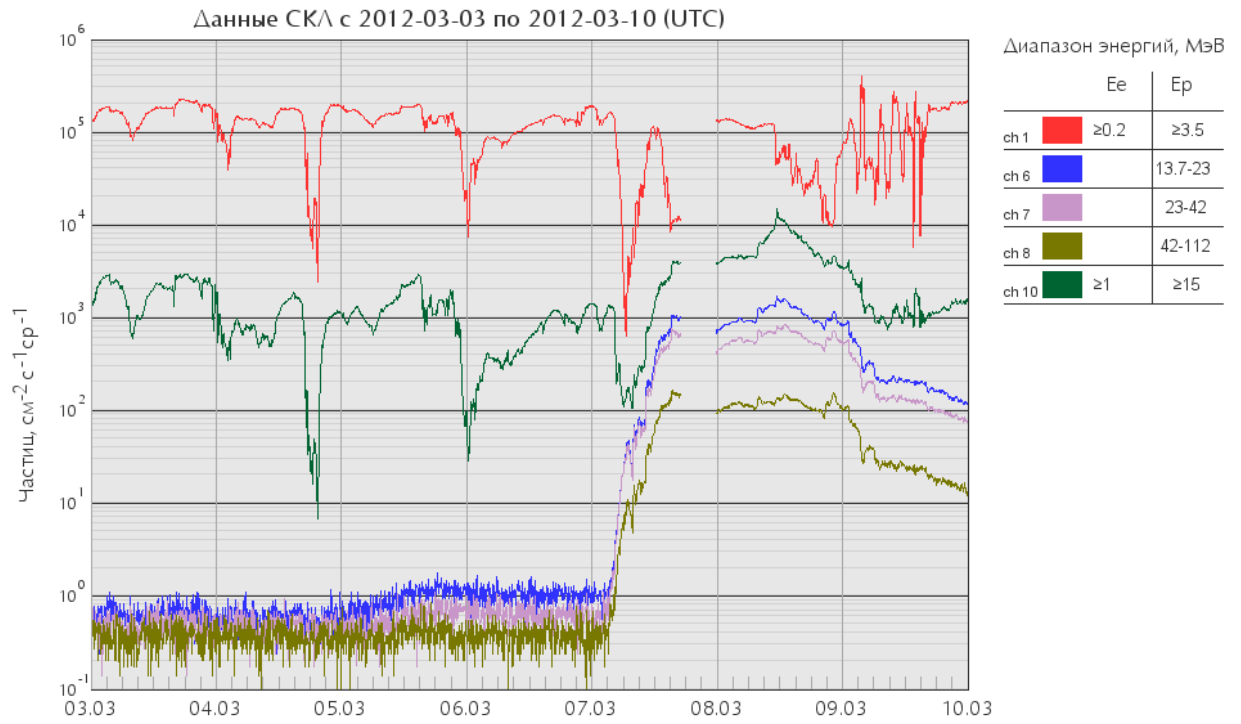


Рисунок 1.7 Данные СКЛ во время вспышки на Солнце 7-9 марта 2012 года[26]

1.3 Внутренняя электризация космических аппаратов

В отечественной науке изучение воздействия космического излучения на материалы и электронное оборудование космических аппаратов датируется началом 60-х годов XX века. 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 круг исследовательских задач значительно расширился, и основной темой 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 [27]. Как видно из формулировок основных направлений, значительное место в исследованиях ЛКМ уделено проблемам электризации оборудования КА, то есть внутренней электризации. Первые результаты изучения проблем воздействия космического излучения были отражены в публикациях того времени [28]. В обобщенной форме итоги первого этапа изучения воздействия космического излучения на элементы КА подведены в докладе А.И.Акишина [29].

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 [30]. По расчётам В.А.Стародубцева, для многих диэлектрических материалов значение критической плотности тока лежит в интервале $0,1 - 1 \text{ нА см}^2$ [31].

С начала 80-х годов, в связи с использованием спутников на геостационарной орбите, обнаружили 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 [22-32]. 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 [27]. 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 объёмного заряда, предложить методы предотвращения

объемной электризации и вызываемых ею электрических разрядов [27]. Были вычислены также пороговые значения флюенса электронов, соответствующие началу возникновения электрических разрядов. Интересно, что в лабораторных экспериментах пороговые значения составили 10^{13} - 10^{14} электронов/см², в то время как в космических условиях данный порог составил 10^{10} - 10^{11} электронов/см².

Исследования электризации космических аппаратов, первоначально осуществляемые в НИИЯФ и на физическом факультете МГУ, впоследствии стали проводиться и в других исследовательских организациях и учреждениях, в том числе в МИЭМ. 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 [35].

Начало достаточно массовому исследованию проблемы внутренней и внешней электризации КА в США было положено в конце 70-начале 80 г.г. XX века. А. Фредериксону принадлежит, видимо, наиболее ранняя работа, посвящённая воздействию радиационного излучения на диэлектрики, которая была опубликована ещё в 1974 году [36]. Впоследствии, в 70-80 г.г. XX века, А. Фредериксон продолжил разработку проблемы воздействия различных видов излучения на диэлектрики, в частности, в 1983 году он публикует статью [37]. Наиболее значимым исследованием А. Фредериксона было участие в изучении проблемы спонтанного разряда различных диэлектриков под воздействием космической радиации. Это получило отражение в коллективном исследовании [38] и итоговой статье [39]. 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. Обе работы основаны на результатах натурных экспериментов на специальном спутнике CRRES [40], но более поздняя работа [39], 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 [39, 43]. Исследование было выполнено при помощи специальной аппаратуры, размещённой на спутнике CRRES, которая обеспечивала фиксацию внутренних разрядов (Internal Discharge Monitor – IDM). 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 измерять 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 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.

Обсуждая изменения в уровне и частотности разрядов с течением времени, авторы исследования склонны связывать эти особенности разрядов (их неравномерность) с эффектом постоянного нахождения диэлектриков под давлением высокого напряжения, в процессе которого диэлектрики производят меньше частичных разрядов с увеличением времени [40]. В данной работе также содержится положение о различиях в величине временной постоянной затухания разряда в связи с различными периодами наблюдений. Авторы статьи воздерживаются от попыток объяснить данный феномен. Они лишь отмечают изменения временной «постоянной» затухания заряда в связи с длительностью наблюдения. В первые семь месяцев временная постоянная затухания импульса составляла 10 часов. После седьмого месяца временная константа падала до одного часа или даже менее

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 нА/см^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 приобретало 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 отечественные 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 продолжают 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» [41, 69].

В последние годы именно феномен внутренней электризации становится всё более востребованным предметом исследований, как в нашей стране [69,71], так и за рубежом. По мнению авторов работы [41], 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 возникновение ЭСР в непосредственной близости от электронных схем КА [41,70]. 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 [41]. Дальнейшая разработка активной защиты представляется перспективным направлением исследований. 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.

Существенную 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) [12, 42],

характеризующую процессы электризации и электростатических разрядов, и комплекс возможных мер, направленных на нейтрализацию нежелательных последствий внешней и внутренней электризации КА.

Важную роль в подготовке руководств сыграли работы ещё одного известного исследователя электризации КА Г. Гэррата, который достаточно активно исследовал проблему внутренней электризации, наряду с рядом других областей исследования. В обобщенном виде результаты исследования эффектов электризации на космических кораблях были изложены Г. Гэрратом в [55], а также вместе с его соавторами в виде одного из первых руководств НАСА [6]. В 1996 году Г. Гэррат и А. Уитлеси обновили данные об электризации космических кораблей. [56]

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 [12], 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 [12].

Строго говоря, отмечают авторы Руководства, данные термины не совсем точны, так как в процессах электризации и последующих разрядах, негативно действующих на аппаратуру КА, участвуют не только диэлектрики, хотя роль последних в данных процесса очень существенна. Большую роль в снижении уровня внутренней электризации играет экранирование посредством различных типов фольги. Каждый космический аппарат оснащён «клеткой Фарадея» различной толщины исчисляемой в алюминиевом эквиваленте в милах (mil). Завершает рассмотрение факторов, способствующих внутренней электризации обобщающая схема, в которой отражены все объекты внутри космического корабля, подверженные электризации (электрические сети и схемы, электронные платы, подложки электронных плат).

Как уже отмечалось, фундаментальное значение для изучения внутренней электризации и практического применения имеет также основные понятия, характеризующие данный процесс. «Это диэлектрическая постоянная материалов или их проницаемость, которая есть сравнительная величина, показывающая соотношение электрического поля внутри материала и в вакууме» [42] Сюда же относится темновая проводимость, выражаемая в $(\text{ом}\cdot\text{см})^{-1}$, относительная диэлектрическая постоянная, диэлектрическую прочность, удельное сопротивление, плотность и временная константа (затухания, релаксация заряда).

Большое значение уделяется описанию ряда явлений, сопутствующих процессам внутренней электризации, и их определению. Например, понятию субштрот (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 характеристиками 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, изучал удельное сопротивление диэлектриков, используемых в печатных платах электронных приборов [43]. В этой работе достаточно подробно показаны трудности, с 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 сопротивления 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 [43], 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 [44].

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) в космосе 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 [44]. 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 полагает, что интенсивные потоки излучений являются важнейшей причиной выхода из 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 одной из наиболее используемых рекомендаций руководства НАСА - положения о «безопасном потоке», то есть о параметрах электронного потока, ниже которого возможна безопасная эксплуатация космических аппаратов. Уровень безопасного потока был определён в 100 фА/см^2 [44]. При таком уровне внешнего потока нет риска внутренней электризации, и данные показатели могут считаться критерием безопасности для работы космических аппаратов. В последующем изложении автор приводит 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 [44] отмечается, что для восполнения пробелов в экспериментальных данных необходимы были длительные экспериментальные исследования. Они были осуществлены с целью установления параметров «безопасного потока» при помощи 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, которые используются в реальных конструкциях. Экранирование этих образцов было обеспечено слоем алюминия толщиной всего 0,2 мм. Во время десятичасового экспериментального полёта спутника со специальной аппаратурой было

выявлено следующее. Во время полета вне зоны потока электронов выше $2 \cdot 10^{10}$ электрон/см² (что эквивалентно непосредственной плотности 90 фА/см²) не возникало разрядов. Поскольку спутники летают по 10 лет и больше, то и поток, безопасный для десятичасовой экспозиции, возможно, не будет таковым для более длительных полётов.

Для выяснения условий более надежной работы аппаратуры, были собраны 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 при выборе 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. Бодэ 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 иные количественные показатели. Постоянная времени для оксида алюминия составила 21 час, для FR4 - 5 дней и 339 дней для тефлона, в то время как в руководстве НАСА приведены значения 0,8 сек, 2,1 часа и 2,1 дня соответственно [44]. 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 состоят 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).

Проблема электризации КА остаётся в центре внимания исследователей. Этой проблеме регулярно посвящаются международные конференции. Материалы международных конференций демонстрируют расширение географии исследований. В XXI веке проблему внутренней и внешней электризации КА изучают в КНР, Индии, Японии [45,46] и даже в Аргентине [47]. Естественно, что данный вопрос также находится в фокусе внимания европейского космического агентства – Европейским объединением разработчиков стандартов для космоса (ECSS) выпускаются документы, такие как стандарт ECSS-E-ST-20-06C, посвященный электризации КА[48]. Конечно, следует отметить, что по сравнению с

руководством НАСА он имеет более общий характер описаний явлений, однако некоторые разделы его требований уже предъявляются к космическим аппаратам разработки ЕКА.

Последняя конференции, посвящённая электризации КА, двенадцатая по счёту, была проведена в Китакиусуи (Япония) 14-18 мая 2012 (Spacecraft Charging Technology Conference). Анализ докладов, представленных на конференцию, даёт возможность выделить перспективные направления исследований в этой области. Ряд из них продолжает изучение проблем, которые ранее были под пристальным вниманием учёных, работающих в этой области. В первую очередь необходимо отметить большое внимание исследователей к феномену космической погоды. Среди них выделяются работы японских и вьетнамских исследователей

По-прежнему фундаментальную роль играют натурные исследования электризации в условиях космических полётов и последующий анализ и интерпретация данных, полученных с КА. Выделим доклады, посвящённые исследованиям на новых спутниках России и США [49, 50]

В тоже время Г.Гэррат был одним из тех, кто открыл новую область исследований – изучение явления электризации у других планет. Уже в 1980 году он вместе с К.Пайком организует сборник «Космические системы и их взаимодействие с околоземным космосом» [51] В последующие годы Г.Гэррат изучает особенности космического излучения в окрестностях Сатурна, Юпитера и проводит сравнительный анализ степени электризации у Земли, Юпитера и Сатурна [52] Для решения этой задачи он использует данные со спутника Галилео. Данное направление исследований электризации КА получило развитие в 2012 году в виде доклада о моделировании электризации в районе Юпитера и окололунного пространства [53]

Важность подобных исследований, которые имеют перспективный характер и рассчитаны на будущее практическое использование, подчёркивается в США созданием специального подразделения НАСА [54].

Оно имеет своей целью «улучшение нашего понимания взаимодействия материалов (КА) и космической среды» [54] В компетенцию данной организации входит изучение космического окружения - погоды (климата) и её воздействия на функционирование КА в межпланетном и околопланетном пространстве. Сокращённое название этой группы учёных SENSE (space environment and spacecraft effects) организация. Данной организации приданы три группы технической поддержки (TWG) для создания научных продуктов и распространения знаний способствующих лучшему функционированию КА. Технические группы имеют следующие наименования и соответственно направленность деятельности: «практика электризации», «эффекты космической среды» и «межпланетная космическая окружение». В центре внимания исследовательской группы внутренняя электризация, возникающая в результате воздействия космической среды. Объектами внимания указанной организации являются разработка материалов соответствующих межпланетным космическим условиям и компьютерное обеспечения моделирования процессов существующих в межпланетном пространстве [54].

1.4 Меры борьбы с поражающими факторами электризации

Одним из интересных направлений отечественных исследований является поиски группой учёных снижения воздействия потока электронов на внутреннюю электризацию КА посредством защиты оборудования при помощи неорганических стеклообразных покрытий особого состава. В качестве средства для защиты от потока электронов была выдвинута идея использовать для этой цели объёмный заряд, который может годами сохраняться в облученном неорганическом стекле. Один из разработчиков данного положения В.В.Цетлин в 1998 году защитил докторскую диссертацию «Взаимодействие электронов со стеклообразными диэлектриками применительно к радиационной защите космических аппаратов» [59] Несколько ранее вышла статья, написанная коллективом

авторов «Снижение дозы радиационного излучения за слоями заряжающихся диэлектриков» [58] В XXI веке исследования в этом направлении были продолжены. Был поставлен вопрос об особом виде материалов, способствующих радиационной защите – «радиоэлектретах». [57-59]

Дальнейшему исследованию указанной проблемы посвящена диссертационная работа Махотина Д.Ю. «Эффекты накопления объёмного электрического заряда в стеклообразных диэлектриках применительно к проблеме радиационной защиты систем жизнеобеспечения космических аппаратов» (2006) [62]. Общая цель исследования указанного автора «изучение процессов поверхностной и объёмной электризации диэлектриков при облучении заряженными частицами позволяет предвидеть возможные негативные явления во время эксплуатации космического аппарата (КА) в условиях воздействия ионизирующего излучения естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ)»[62]. В работе Д.Ю.Махотина поддерживается тезис о возможности использования такого явления как накопления объёмного заряда в качестве защиты от потока электронов, ослабления его мощности. «Применение диэлектрических материалов, способных накапливать объёмный электрический заряд непосредственно во время полёта КА, может позволить повысить эффективность защиты, не увеличивая массу покрытий.» [62] В последние годы были синтезированы многокомпонентные боро- и силико-фосфатные стёкла, способные выполнять защитную функцию от излишней внутренней электризации элементов оборудования КА. Проведённые исследования и последующие расчёты показали, что «наличие электрического поля объёмного заряжения в стеклянных покрытиях приводит к уменьшению поглощённой энергии за счёт дополнительного ослабления потока электронов. Наиболее эффективно ослабляется мягкая часть спектра – до 50-70 %». [61,62] На жёсткую часть спектра подобная защита действует менее эффективно.

Но, тем не менее, «проведённые исследования тонких образцов стёкол показали, что после облучения на ускорителе электронов в них сохраняется

объёмный электрический заряд с напряжённостью поля порядка 1,5 МВ/см при разности потенциалов 80-90 кВ, что приводит к уменьшению коэффициента прохождения на 10-12 %» [62]

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. [63]. 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 электроотрицательные газы (ЭОГ) для подавления электростатических разрядов, обусловленных внутренней электризацией изделий. Типичным представителем этой группы газов является гексафторид серы SF₆. Этот газ успешно используется в 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 с зарядкой различных диэлектрических и металл-диэлектрических образцов электронным пучком (энергия электронов 20 - 30 кэВ, плотность тока $\sim 10^{-8}$ А/см²) 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 [63].

Показано, что в среде SF_6 при давлении около 10^{-4} мм. рт. ст. потенциал образцов значительно снижался (до $\sim 50\%$), 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 действие оказывал также воздух, в составе которого присутствует электроотрицательный газ кислород; практически никакого воздействия не оказали другие газы (N_2 , Ar), взятые для сравнения. Безусловно, что предложенный способ защиты от негативного влияния потока электронов на бортовую аппаратуру нуждается в натуральных 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.

Также существует подход, согласно которому можно избежать накопления заряда от потока электронов в объеме диэлектрика путем повышения его радиационной электропроводности. В русле этого подхода осуществлялись исследования А.Б.Соколова, которые были обобщены в его докторской диссертации «Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов» (2009) Важную роль в исследованиях А.Б.Соколова, А.П. Тютнева [64-66] играет развитие теории радиационной электропроводимости полимеров внешней поверхности КА и на этой основе сформулирован принцип минимальной радиационной электропроводности (МРЭ), что в свою очередь даёт возможность расчёта электрических полей в ЭВТИ. [66] Автор исследования приводит также параметры электрических разрядов на космических аппаратах. «Основные характеристики электрических зарядов на КА следующие:

- разность потенциалов до 20 кВ; токи разрядов до 100 А ;
- длительность фронта ЭСР от 10^{-9} до 10^{-7} с ;
- длительность ЭСР от 10^{-7} до 10^{-6} с;

- энергия ЭСР до 0,2 Дж;
- частота разрядов до 10 Гц.

При типовой длительности разряда и его фронтов длина излучаемых электромагнитных волн составляет 3-300.[67] В диссертации А.Б.Соколова собраны данные об электризации элементной базы БРЭА под воздействием излучений ЭСР. В принципе, поглощённая энергия индуцируемая электромагнитными импульсами может иметь и другой источник происхождения. Итак, при поглощённой энергии 10^{-7} - 10^{-8} Дж появляются сбои в работе БРЭА, при энергии 10^{-7} Дж происходит выгорание диодов в микроволновых смесителях, при энергии 10^{-6} Дж наблюдаются сбои в работе или выгорание линейных интегральных схем, при энергии 10^{-5} Дж – сбои в работе и выгорание маломощных транзисторов и интегральных схем на биполярных транзисторах, при энергии 10^{-4} Дж повреждения транзисторов средней мощности, конденсаторов и диодов».

Рассматривается два основных пути выхода из строя аппаратуры КА. Первый – в результате электромагнитных излучений, которые являются следствием поверхностного ЭСР. И второй – в результате объёмной электризации элементной базы БРЭА. «Как показали модельные лабораторные исследования и исследования, проведённые в натуральных условиях эксплуатации КА, - отмечает автор, - поверхностные ЭСР возникают, когда напряжённость электрического поля между элементами поверхности КА достигает значения 10^7 В/м, или когда разность потенциалов между металлическим проводником и заряженным диэлектриком превышает 500 В. Объёмные ЭСР возникают, когда напряжённость электрического поля в объёме диэлектриков превышает уровень $2 \cdot 10^7$ В/м». [67] В ней последовательно отслеживается определённая взаимосвязь между этими двумя видами разрядов и сформулировано положение о целостном подходе к проблеме электризации КА.

Ещё одним направлением в изучении электризации КА с целью нейтрализации её негативных последствий является создание новых

материалов для элементной базы бортовой аппаратуры, в 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. По сути, это использование не радиационной, а темновой электропроводности для защиты применяемых диэлектриков. В основу предложенной концепции положено требование, ограничивающее применение в КА диэлектрических материалов с проводимостью ниже значения $10^{-9} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Выполнение этого требования обеспечит сток зарядов из объема диэлектриков без электростатических разрядов, и, таким образом, создаст адекватную защиту КА [14]. Дальнейшее развитие изучения радиационной электропроводности было изложено в работе А.П. Тютнева и авторов [68], посвященной квалификации материалов для составных частей КА на его поверхности.

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. 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 специалистов-практиков 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 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 их воздействии на материалы КА, в США и России развёрнуты многочисленные исследования. Проводится 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 позволили получить новые данные о количественных характеристиках, используемых в космонавтике материалов. Особенно поучительной является история изучения удельного объёмного сопротивления и постоянной времени релаксации заряда. Оказалось, что значение 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 [64]. Результаты проведенных испытаний очень важны для отбора материалов, пригодных для длительной эксплуатации в составе КА.

В 21 веке значение космических аппаратов самого различного назначения существенно возросло. В настоящее время во втором десятилетии 21 века от успешного функционирования спутников зависит не только мобильная связь, прогноз погоды, передача телевизионного сигнала и выполнение оборонных задач. КА стали важнейшим способом коммуникации для многих жителей Земли, широко используются современные навигационные системы, спутники осуществляют функционирование финансовых сетей, поддерживают международные системы банковской оплаты и ещё многое другое. Выход из строя

спутников, потеря с ними связи, всевозможные отказы в работе БРЭА парализуют те или иные сегменты экономики, приносят огромные убытки. Естественно поэтому, что изучение электризации КА, особенно внутренней как наиболее частой причины выхода КА из строя остаётся актуальной темой исследований во многих странах мира.

В числе перспективных направлений исследований по-прежнему остаётся разработка более совершенных методов тестирования элементной базы электронной аппаратуры, усложнение методов экспериментального воспроизведения ситуации «наихудших условий» на геостационарных орбитах, совершенствование материалов из которых сделаны электронные платы, специально изучается воздействие температуры (в том числе сверхнизких) на оборудовании КА. Расширились география исследований внутренней и внешней электризации. Если раньше в XX веке это были в основном США и Россия (СССР), то во втором десятилетии XXI века стран-участников изучения проблем электризации стало намного больше. Стали регулярно проводиться международные конференции, посвящённые внутренней и внешней электризации КА. Существенную роль в указанной области исследований играет изучение именно внутренней электризации.

Таким, образом, можно сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

Целью диссертационной работы является повышение устойчивости космической бортовой аппаратуры к поражающим факторам внутренней электризации за счет разработки метода повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к возникновению электростатических разрядов путем применения в печатных узлах диэлектрика, обладающего нанопроводимостью.

Для достижения поставленной цели было необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Выполнить обзор и анализ причин возникновения и существующих методов защиты БРЭА космических аппаратов от процессов внутренней

электризации и сопровождающих её электростатических разрядов и сформулировать целевую задачу. На основе анализа этих методов сформулировать новое направление для устранения внутренней электризации БРЭА КА. Это направление предполагает использование в качестве диэлектриков печатных узлов бортовой аппаратуры КА диэлектриков, обладающих нанопроводимостью.

2. Провести компьютерное моделирование работы типового цифрового устройства мультивибратора для обоснования возможности замены традиционных диэлектриков печатного узла на диэлектрики, обладающие нанопроводимостью и исключающие возможность возникновения электростатических разрядов при электронном облучении.

3. Разработать методику и изготовить модельный диэлектрик, обладающий требуемым значением объемной проводимости для исключения возможности возникновения электростатических разрядов при электронном облучении.

4. Разработать методику и выполнить тестовые эксперименты по определению электризуемости модельного диэлектрика под действием электронного облучения в вакууме, в условиях близких к натурным условиям эксплуатации. Запатентовать предложенное в диссертации техническое решение.

5. Разработать методику экспериментальных исследований типового цифрового устройства мультивибратора путем применения модельного диэлектрика с нанопроводимостью, и провести сравнение с результатами компьютерного моделирования.

6. Разработать метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к ЭСР, выполнить экспериментальную проверку метода, провести оценку влияния повышенной проводимости диэлектрика печатной платы на характеристики БРЭА.

Таким образом, в данной работе будет обоснован один из способов преодоления негативного влияния внутренней электризации.

Глава 2 Схемотехническое моделирование воздействия материала с заданными свойствами на работу типового электронного устройства – мультивибратора.

В предыдущей главе были рассмотрены основные направления исследований, посвящённые преодолению негативных эффектов объёмной электризации элементной базы БРЭА КА и был представлен один из путей решения данных проблем, состоящий в совершенствовании диэлектрической составляющей БРЭА КА. Таким образом была поставлена целевая задача всего исследования доказать возможность существенного снижения влияния негативных эффектов внутренней электризации на аппаратуру КА путем совершенствования диэлектрических материалов корпусов элементов, печатных плат. Но для того чтобы приступить к применению таких материалов необходимо проделать значительный объём предварительных работ, состоящих в использовании математического аппарата для расчетов параметров исходных состояний и последующих изменений исследуемых материалов, а также провести компьютерное моделирование работы типового цифрового устройства мультивибратора для обоснования возможности замены традиционных диэлектриков печатного узла на диэлектрики, обладающие нанопроводимостью и исключающие возможность возникновения электростатических разрядов при электронном облучении. В данной главе будет рассмотрена задача расчетно-теоретического и схемотехнического моделирования воздействия такого материала на работу типового электронного устройства – мультивибратора.

Для выполнения этой задачи необходимо также обоснование возможности её решения в общем виде, то есть создания расчетно-математической модели исследуемых процессов. В первую очередь это касается выяснения оптимизации величины удельной объёмной электропроводности диэлектрика печатной платы изучаемого прибора -

типового цифрового устройства (мультивибратора) При изучении явления заряжения поверхностей диэлектриков в элементной базе БРЭА (в частности, печатных плат) необходимо провести расчет токов, стекающих на проводники и заделки с фиксированным потенциалом из облучаемой диэлектрической поверхности определенной толщины с заданной удельной объемной электропроводностью γ_d (темновая). Ввиду особенностей космического полёта, радиационная электропроводность мала и её вкладом в общее протекание процесса электризации можно пренебречь.

В таком случае, сток заряда на электроды обеспечивается за счет γ_d , которая может рассматриваться как постоянная величина. Проблема сводится, таким образом, к решению соответствующей задачи по расчету распределения полей и токов в квазистационарном приближении для нестандартной геометрии электродов.

Увеличивая темновую электропроводность диэлектрического материала, можно добиться полного устранения его заряжения и исключения, таким образом, электростатических разрядов в радиоэлектронном устройстве. Но возникает другая проблема, связанная с токами утечки с подводящих проводов на корпус космического аппарата или между проводниками, находящимися под напряжением. По условиям эксплуатации оборудования это может оказаться недопустимым. Таким образом, необходимо уметь рассчитывать токи, протекающие между активными элементами радиотехнических устройств по поверхности печатной платы, диэлектрик которой обладает определенной электропроводностью, причем делать это нужно для произвольной геометрии электродов. Для этой цели полезно использование аналогии токов на постоянном и переменном напряжении (гармонически изменяющимся во времени). Рассмотрим постановку задачи в общем виде.

2.1 Расчетно-теоретическая модель

Итак, имеем два металлических тела произвольной формы, погруженных в слабо проводящую среду с электропроводностью γ_d и находящихся под постоянным напряжением V_0 . Требуется найти величину тока I_0 , протекающего между ними. Прямое экспериментальное определение тока по техническим причинам невозможно (ток мал, а увеличение напряжения для его усиления недопустимо).

Рассмотрим теперь ситуацию при замене постоянного напряжения на переменное с угловой частотой ω и незначительной амплитудой V_m , много меньшей допустимого напряжения. В анализируемой системе опять установится квазистационарное распределение полей и токов в пространстве, также гармонически изменяющихся во времени. При выборе достаточно высокой частоты влиянием электропроводности γ_d на распределение полей и токов можно пренебречь (ее роль переходит к величине $\gamma_\omega = \varepsilon\varepsilon_0\omega$, где $\varepsilon\varepsilon_0$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика).

Силовые линии тока в случае переменного напряжения ($\vec{j}_\omega = \partial\vec{D}/\partial t$, где \vec{D} - вектор индукции электрического поля) имеют ту же пространственную структуру, что и силовые линии тока в случае постоянного напряжения. В частности, и те и другие ортогональны границам (поверхностям) проводников. В случае переменного тока нас, естественно, интересуют соотношения амплитуд токов и напряжений, а не фазовые соотношения между ними (напряжение опережает ток на 90°).

Существует формальная аналогия уравнений Максвелла в электростатике при отсутствии объемных зарядов и внутри проводника для токов проводимости. Вектор электрической индукции \vec{D} в электростатике ($\rho=0$) и вектор плотности тока стационарного процесса \vec{j} подобны друг другу. Имеет место и подобие граничных условий.

Понятию емкости C (на постоянном токе) в электростатике соответствует понятие проводимости G в теории стационарного электрического поля в проводнике. Возвращаясь к задаче двух металлических тел имеем в электростатике $C = q / \Delta\varphi$, а при наличии слабой проводимости $G = I / \Delta\varphi$, где $\Delta\varphi$ - разность потенциалов. Величина, обратная G есть сопротивление среды между двумя проводниками. Аналогия является полной, поскольку потоки векторов \vec{D} и \vec{j} через поверхность, охватывающую один из проводников, равны соответственно полному заряду q на нем и полному току I , втекающему в него.

Отсюда сразу следует важное интегральное соотношение:

$$G = 1 / R = \frac{\gamma_d}{\varepsilon\varepsilon_0} C \quad (2.1)$$

Таким образом, рассчитав емкость системы в электростатике или измерив ее электротехнически на частоте 1 кГц (они практически совпадают в пределе 10-30 % для большинства диэлектриков, что вполне достаточно для технических целей), можно оценить ток утечки через изоляцию. Для емкости $C = 0.01$ мкФ и $\gamma_d = 10^{-9}$ Ом⁻¹м⁻¹ ($\varepsilon = 3.0$) найдем, что $G = 3.8 \times 10^{-7}$ Ом⁻¹ или сопротивление $R = 2.6 \cdot 10^6$ Ом (2.6 МОм).

На этом же принципе базируется моделирование электростатических полей в электролитической ванне. При таком подходе проводники требуемой формы помещают в электролит и, создав нужные потенциалы, измеряют плотность тока в различных участках объема. Использование формулы (1) позволяет существенно упростить проведение подобных испытаний. Теперь достаточно измерить емкость в системе двух проводников на воздухе и по заданной проводимости диэлектрика сразу рассчитать величину сопротивления R , а по нему и ток I , используя закон Ома ($I = V_0 / R$).

При аналитическом решении задач, типичных для технологии печатных плат, часто применяется двумерное приближение (токи утечки

через тонкую диэлектрическую пленку), которое в свою очередь позволяет воспользоваться мощным аналитическим аппаратом метода конформных отображений из теории функций комплексных переменных. Одна из решенных нами задач может быть сформулирована следующим образом.

Для двух проводящих цилиндров с параллельными осями имеем следующее выражение для проводимости на единицу длины цилиндров

$$G = 2\pi\gamma_d \left[\operatorname{arccos} h \frac{D^2 - R_1^2 - R_2^2}{2R_1R_2} \right]^{-1} \quad (2.2)$$

Здесь R_1 и R_2 - радиусы цилиндров, а D - расстояние между их осями.

Проводимость цилиндра и плоскости, разделенных расстоянием, равна

$$G = 2\pi\gamma_d \left(\operatorname{arccos} h \frac{l}{R} \right)^{-1} \quad (2.3)$$

Если же речь идет о плоской проводящей пленке с удельной поверхностной проводимостью Γ , то для нахождения G нужно использовать формулу (2.2) с заменой γ_d на Γ .

Для двух проводящих сфер в слабо проводящей среде получено

$$G = \gamma_d \left(\frac{1}{4\pi R_1} + \frac{1}{4\pi R_2} - \frac{1}{2D} \right)^{-1} \quad (2.4)$$

В качестве последнего примера рассмотрим решение еще одной типовой задачи, которая допускает применение метода конформных отображений (рис. 2.1). Здесь верхний и нижний электроды - это плоские проводящие поверхности, нормальные к оси y ($y=0$ и $2L$) и находящиеся под потенциалом земли. Проводящая полуплоскость ($y=0, x \leq -a$) также заземлена, а другая проводящая полуплоскость ($y=0, x \geq a$) находится под потенциалом V_0 . Межэлектродное пространство заполнено слабо проводящей средой. Рассчитывается ток утечки на единицу длины по оси Z между двумя внутренними электродами.

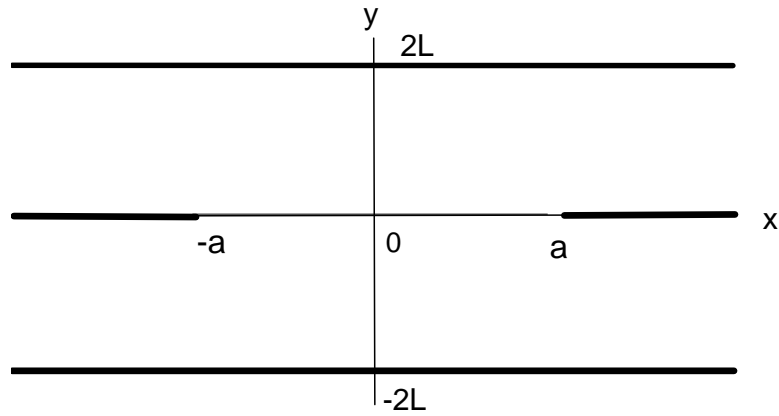


Рисунок 2.1 Схема расположения электродов при рассмотрении задачи расчета тока утечки на единицу длины по оси Z .

В работе [72] был получен точный результат для пространственного распределения поля и плотности тока. На основании этих результатов, применим значение величины полного тока утечки I между внутренними электродами. Полученное решение имеет вид

$$I = (2 / \pi) \gamma_d V_0 \ln \left[1 + 2B^{-1} + \sqrt{(1 + 2B^{-1})^2 - 1} \right] \quad (2.5)$$

и $B = \exp(2\pi a/L) - 1$. При $a/L \geq 3$ формула (2.5) упрощается

$$I = (4 / \pi) \gamma_d V_0 \exp(-\pi a / L) \quad (2.6)$$

Поле в зазоре ($y=0$, $-a \leq x \leq a$) чисто тангенциальное и растет до бесконечности при приближении к его краям, но его интеграл по x сходится и равен, естественно, V_0 . При $L \rightarrow \infty$ ток также неограниченно возрастает, отражая тот факт, что объем области пространства с отличным от нуля полем растет.

При использовании рассмотренной выше аналогии (уравнение 2.1) следует иметь в виду, что условие полного заполнения пространства, в котором электрическое поле не равно нулю, слабо проводящей средой обязательно. При измерении взаимной емкости двух проводниковых тел для индукции поля D доступно все пространство (у воздуха $\varepsilon \approx 1.0$), а в реальной геометрии слабо проводящая среда зачастую заполняет лишь наибольшую его часть. Следует уточнить, что оценивая ток утечки между двумя проводящими полосками, на диэлектрической подложке печатной

платы, необходимо отдавать отчет в том, что ток проводимости проходит только через подложку, а воздух тока не проводит. Поэтому необходимо вносить поправку в сторону уменьшения теоретического значения, ориентируясь на полуколичественные оценки [73]. Для внутренних проводников многослойных печатных плат такие поправки естественно не нужны.

2.2 Экспериментальное получение исходных данных для расчетно-теоретической модели

Экспериментальное получение исходных данных для расчетно-теоретической модели оптимизации величины удельной объемной электропроводности радиодиелектрика печатной платы типового цифрового устройства (мультивибратора) проводилось двумя независимыми методами:

- проводился компьютерный расчет выходного сигнала симметричного мультивибратора по принципиальной схеме рис. 2.2 с помощью программы расчета электронных схем LTspice IV;

- выполнялось макетирование симметричного мультивибратора, и затем выходной сигнал регистрировался с помощью цифрового осциллографа Tektronix 3012B;

LTspice IV является мощной программой схемотехнического проектирования для моделирования электрических схем. Эта разработка фирмы Linear Technology (США, Калифорния) является бесплатной и свободно распространяется разработчиком. Этот пакет использует хорошо известный язык описания электрических схем пакета SPICE, ставший де-факто стандартом для мировых автоматизированных систем проектирования схем. Вместе с тем, пакет LTspice IV также имеет интуитивно понятный графический интерфейс представления схемы и ее элементов, и освоение его не составляет больших трудностей, а также хорошую скорость построения модели. Подробный обзор на русском языке возможностей и принципов работы с этим программным обеспечением дан в [74]

На рисунке 2.3 представлен выходной сигнал мультивибратора представленного на рис. 2.2. Расчет проведен с помощью программы анализа электронных схем LTspice IV.

На рис 2.4. представлен выходной сигнал мультивибратора представленного на рис. 2.2. Расчет проведен с помощью программы анализа электронных схем LTspice IV. Изменен масштаб по оси x. Период колебаний $T = 1,63$ мс. Амплитуда выходного напряжения 9,8 В.

На рис. 2.5 представлен выходной сигнал макетного образца мультивибратора выполненного по принципиальной схеме, представленной на рис. 2.2. Резисторы макетного образца имеют разброс сопротивления $\pm 1\%$, конденсаторы имеет разброс емкости $\pm 10\%$. Период колебаний $T = 1,44$ мс. Амплитуда выходного напряжения 9,8 В. Измеренный потребляемый ток 5,4 мА.

Незначительное различие (11,6%) расчетного периода колебаний ($T = 1,63$ мс) и измеренного периода колебаний на макетном образце ($T = 1,44$ мс) обусловлено разбросом емкостей и сопротивлений использованных радиоэлементов.

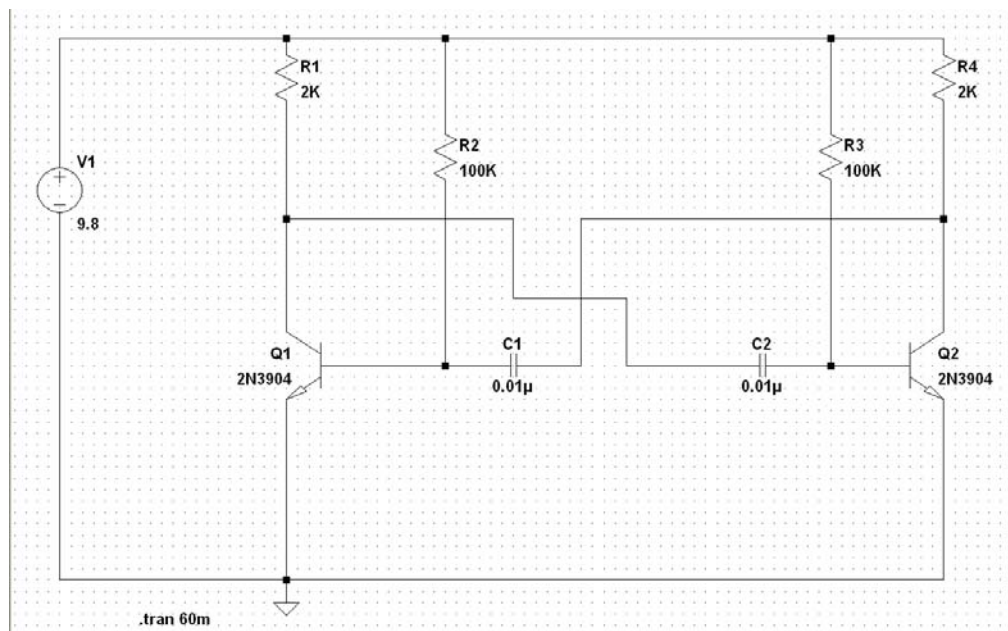


Рисунок 2.2 Принципиальная схема типового цифрового устройства – мультивибратора



Рисунок 2.3 Выходной сигнал мультивибратора. Расчет с помощью программы анализа электронных схем LTspice IV

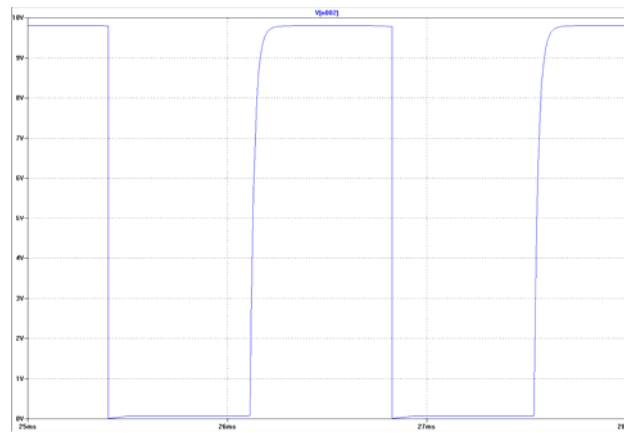


Рисунок 2.4 Выходной сигнал мультивибратора. Расчет с помощью программы анализа электронных схем LTspice IV. Изменен масштаб по оси x. Период колебаний $T = 1,63$ мс. Амплитуда выходного напряжения 9,8 В

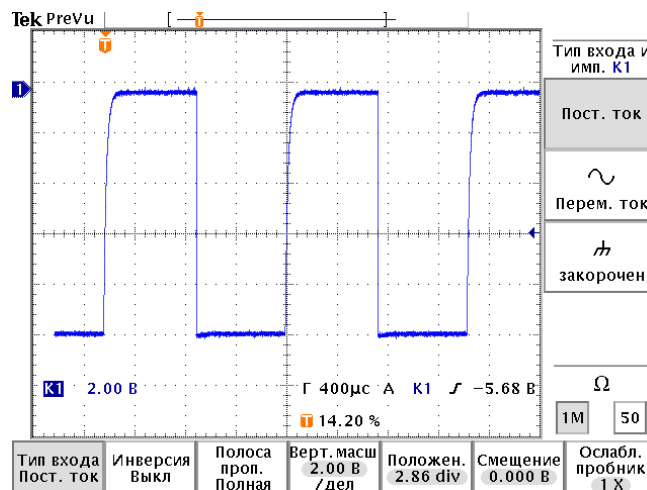


Рисунок 2.5 Выходной сигнал макетного образца мультивибратора выполненного по принципиальной схеме, представленной на рис. 2.2. Резисторы макетного образца имеют разброс сопротивления $\pm 1\%$, конденсаторы имеет разброс емкости $\pm 10\%$. Период колебаний $T = 1,44$ мс. Амплитуда выходного напряжения 9,8 В. Потребляемый ток 5,4 мА

Далее экспериментальное получение исходных данных для расчетно-теоретической модели оптимизации величины удельной объемной электропроводности диэлектрика печатной платы типового цифрового устройства (мультивибратора) проводилось следующим образом. Принципиальная схема, представленная на рис. 2.2 была дополнена одиннадцатью резисторами R5...R15, призванными имитировать дополнительные утечки в схеме за счет применения диэлектрика, обладающего нанопроводимостью в качестве материала печатной платы мультивибратора. Преобразованная таким образом принципиальная схема мультивибратора представлена на рис. 2.6. Для этой схемы были проведены расчеты выходного сигнала мультивибратора с помощью программы расчета электронных схем LTspice IV. При расчетах все дополнительные резисторы R5...R15 имели одинаковое сопротивление. При сопротивлениях резисторов 5 МОм, 2 МОм и 1 МОм искажений выходного сигнала мультивибратора не наблюдалось. Искажения выходного сигнала мультивибратора появились, когда номиналы резисторов были снижены до величины 500 кОм, и искажения усилились при снижении номиналов резисторов R5...R15 до 200 кОм. Соответствующие расчетные данные приведены на рис. 2.7, рис. 2.8, рис. 2.9.

Макетный образец мультивибратора был дополнен в соответствии со схемой рис. 2.6 резисторами R5...R15 номиналом 1 МОм. Полученная для этого случая осциллограмма ничем не отличается от осциллограммы выходного сигнала исходного мультивибратора приведенной на рис. 2.5.

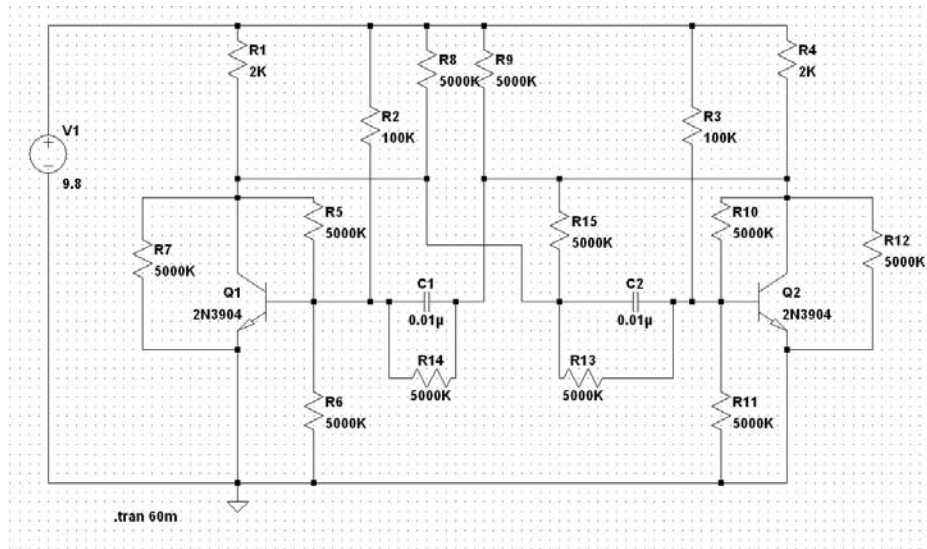


Рисунок 2.6 Преобразованная принципиальная схема мультивибратора дополнена одиннадцатью резисторами R5...R15, призванными имитировать дополнительные утечки в схеме за счет применения диэлектрика, обладающего нанопроводимостью, в качестве материала печатной платы мультивибратора

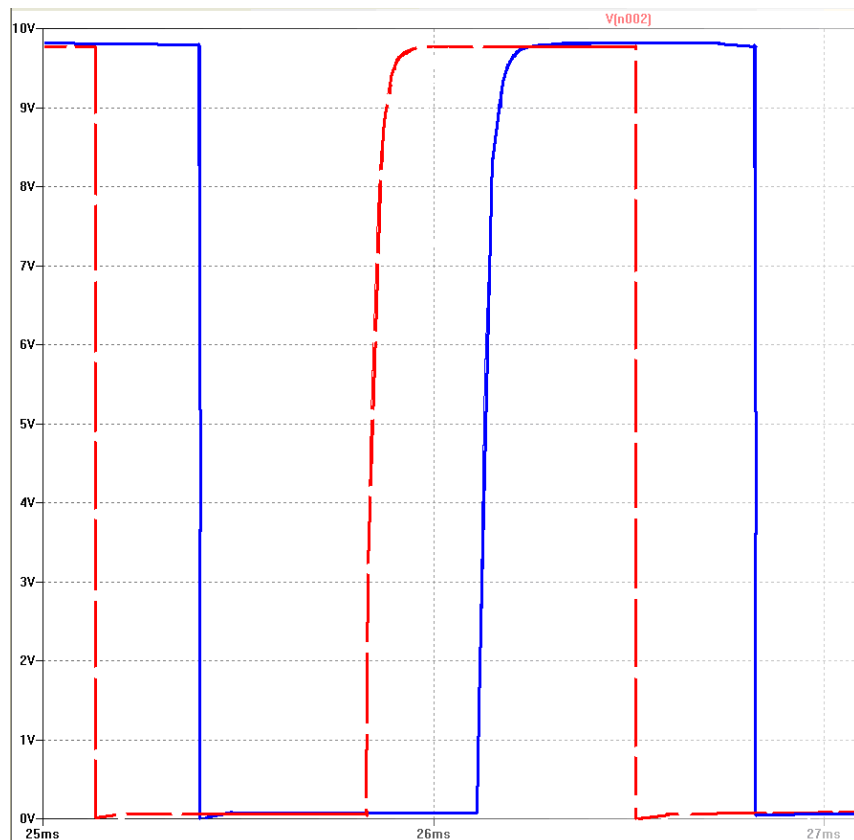


Рисунок 2.7 Совмещенные выходные сигналы мультивибратора:

- синяя линия (сплошная) исходный мультивибратор;
- красная линия (прерывистая) преобразованный мультивибратор(смещена), сопротивления резисторов R5...R15 составляют 5 МОм, 2 МОм, 1 МОм

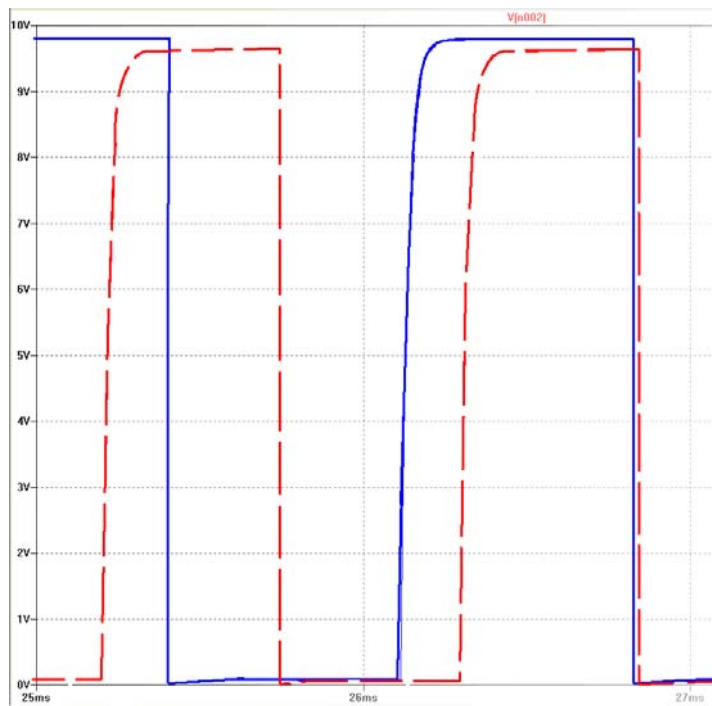


Рисунок 2.8 Совмещенные выходные сигналы мультивибратора:

- синяя линия (сплошная) исходный мультивибратор;
- красная линия (прерывистая) преобразованный мультивибратор, сопротивления резисторов R5...R15 составляют 500 кОм.

Период колебаний преобразованного мультивибратора $T = 1,1$ мс, амплитуда выходного напряжения 9,65 В. Потребляемый ток 5,5 мА

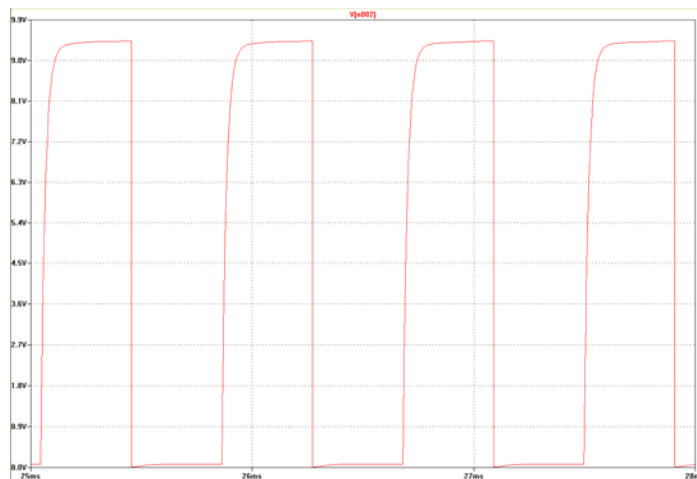


Рисунок 2.9 Выходной сигнал преобразованного мультивибратора, сопротивления резисторов R5...R15 составляют 200 кОм. Период колебаний $T = 0,8$ мс, амплитуда выходного напряжения 9,45 В. Потребляемый ток 5,7 мА

Таким образом, проведено предварительное компьютерное моделирование работы типового цифрового устройства - мультивибратора

для обоснования возможности замены традиционных диэлектриков печатного узла на нанопроводящие диэлектрики, исключающие возможность возникновения электростатических разрядов при облучении потоком электронов. Мультивибратор был рассчитан в программе симуляции электрических схем LTspice IV, выходной сигнал с него сравнивался с реальным выходным сигналом типа «меандр» с макетной схемы мультивибратора на транзисторе 2N3904, подключенной к запоминающему осциллографу Tektronix 3012B. Незначительное различие (11,6%) расчетного периода колебаний ($T = 1,63$ мс) и измеренного периода колебаний на макетном образце ($T = 1,44$ мс) обусловлено разбросом емкостей и сопротивлений использованных радиоэлементов. Затем, для имитации применения нанопроводящего диэлектрика (с необходимым удельным электрическим сопротивлением 10^9 Ом·м) в узлы расчетной схемы (на рисунке 2.2) были последовательно добавлены высокоомные резисторы номиналом в 1, 5 и 10 МОм как имитация утечек в диэлектрике, обладающем нанопроводимостью. Искажений после расчета и симуляции выходного сигнала мультивибратора не наблюдалось, однако при дальнейшей замене резисторов номиналом в 500 кОм и 200 кОм появились существенные искажения формы и периода сигнала. Аналогичное сравнение было проведено с макетным образцом, дополненным резисторами 1 МОм – никаких отличий выявлено не было.

Выводы:

Проведено предварительное компьютерное моделирование работы типового цифрового устройства: мультивибратора, для обоснования возможности замены традиционных диэлектриков печатного узла на нанопроводящие диэлектрики, исключающие возможность возникновения электростатических разрядов при электронном облучении. Показана возможность такой замены.

Глава 3 Технология изготовления модельного диэлектрика (нанопроводящего материала) и исследование его электрофизических свойств

В предыдущей главе была показана возможность использования нанопроводящего диэлектрика в бортовой электронике, путем расчета модели типового устройства в программе схемотехнического моделирования. В данной главе пойдет речь об отработке технологии получения такого материала, обладающего нанопроводимостью, в лабораторных условиях, исследованиях его электрофизических свойств в зависимости от количества добавленного проводящего составляющего.

3.1 Электропроводящие полимеры

Наполненные полупроводниковые и электропроводящие полимеры это обширный класс материалов, характеризующихся электрической проводимостью, обусловленной введением в структуру полимера проводящих компонентов. Это гетерогенные системы, состоящие из проводящих, связующих компонентов и наполнителей. По своей связующей основе наполненные полимеры могут быть разделены на карбоцепные и гетероцепные. Таким образом, исходный полимер играет роль связующего материала, определяя физико-химические свойства результирующего композитного материала.

3.2 Проводящие компоненты.

В наполненных полимерах в качестве проводящих компонентов широко используются порошкообразные материалы такие, как технический

углерод, графит, мелкодисперсные частицы серебра и других металлов. Задача получения таких полимеров хорошо изучена, однако свойства полимеров при этом могут претерпеть значительные изменения из-за большого количества вводимых добавок, сведенных в таблице 3.1 из обзорной статьи [75]

Таблица 3.1

Наполнитель	Вид наполнителя	Степень наполнения, %	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	Литературный источник (из [75])
Металлические наполнители				
Серебро	Порошок	75	10-3	[1]
	Частицы чешуйчатой формы	60	10-4	[5]
Медь	Порошок	80	10-3	[4]
	Волокно	8	10	[12]
	Волокно	88	10-3	[12]
Алюминий	Обработанный порошок	30	10+4	[3]
	Хлопья	30	10-1	[3]
Углеродсодержащие наполнители				
Технический углерод ПМ-100	Порошок	30	10-2	[2]
Грален-2	Волокно	20	10-0	[13]

Использование углерода и графита обусловлено, помимо их электрических свойств, химической инертностью и устойчивостью к нагреванию. Ценной особенностью некоторых видов углерода является их способность структурироваться в цепные комплексы. В данной диссертационной работе было выбрано сочетание парафина и технического углерода в качестве модельного диэлектрика, используемое также для изучения свойств проводимости электропроводящих полимеров, таких как порог перколяции (количество проводящей добавки в полимере для

возникновения проводимости) в работах [76] Рассмотрим более подробно наиболее часто используемые проводящие компоненты.

3.2.1 Технический углерод (сажа)

Технический углерод (сажа) - продукт неполного сгорания или термического разложения углеродистых веществ, представляет собой темный порошок, состоящий из высокодисперсных частиц размерами 10-100 нм. В качестве сырья служат газообразные и твердые углеводороды такие, как ацетилен, природный газ, антрацен и т.п. Общая технологическая операция это сжигание сырья при малом содержании кислорода или термическое разложение в отсутствие воздуха. После данной операции технический углерод собирается, очищается, уплотняется и гранулируется в рабочие частицы. Первичная структура технического углерода представляет собой беспорядочно расположенные «пакеты» плоских молекулярных слоев. Расположение слоев носит нерегулярный характер по сравнению с графитом, а расстояние между слоями несколько больше, чем у графита. В рабочей частице кристаллиты связаны между собой сильными валентными связями и, как правило, не могут быть разрушены обычным механическим воздействием. Размеры кристаллитов составляют от 2 до 6 нм. Один кристаллит содержит в среднем 100-200 атомов углерода. Размеры рабочей частицы зависят от способа получения технического углерода. Рабочая частица может содержать от нескольких сотен до миллиона первичных кристаллитов. Основными признаками электропроводящего технического углерода являются малость размеров частиц, высокая степень их агрегации и пористости. Последняя оценивается по степени шероховатости частиц, т.е. отношению их удельной поверхности к диаметру. Таким образом активная удельная поверхность рабочих частиц технического углерода составляет десятки-сотни $\frac{m^2}{г}$. Одним из важных показателей технического углерода является содержание летучих примесей, которое может достигать 12-15 %. В их состав входит кислород, водород, азот, метан. При осаждении частиц в

результате окисления на поверхности образуются кислородные группы (фенольные, карбонильные, карбоксильные и т.п.), которые сравнительно слабо влияют на электрические свойства. Однако при диспергировании технического углерода в связующем компоненте (полимере) влияние этих групп становится весьма значительным. Обычно диспергирование улучшается с повышением содержания летучих компонентов, поэтому в ряде случаев специально прибегают к окислению. Для этого используют различные кислоты, прокаливают при 600-700 °С, подвергают помолу в мельницах и т.п.

Особенностью некоторых видов технического углерода является способность к структурированию, а именно к образованию длинных прочных цепочек из отдельных частиц. Образованию цепочек способствуют свободные (оборванные) связи отдельных кристаллитов. Совокупность цепочек образует подобие каркаса технического углерода, внутренний объем которого заполнен связующим компонентом. Из-за структурирующей способности технического углерода его относительный объем в электропроводящих полимерах может быть очень малым при частичном сохранении непрерывности проводящих цепочек, что способствует получению электропроводящих полимерных материалов с хорошей воспроизводимостью параметров. При слабом структурировании проводимость полимеров резко изменяется с изменением количества технического углерода.

Особенность порошков технического углерода, влияющая на электропроводность, связана в первую очередь с его энергетической неоднородностью, обусловленной нескомпенсированностью σ - и π -связей, находящихся на границах кристаллитов. При повышенной температуре происходит компенсация связей кислородом и образующиеся на поверхности комплексы, наряду с другими активными центрами, играют важную роль в формировании структуры и свойств наполненного полимера. С дальнейшим повышением температуры происходит термическая десорбция - удаление

кислорода. Процесс заканчивается при температурах порядка 1200 °С. Поэтому нельзя ожидать простого взаимодействия активных центров с радикалами связующего компонента, т.е. возникают карбоксильные, гидроксильные, карбонильные и прочие группы.

3.2.2 Наполнители для получения высокой проводимости

В том случае, когда необходимо получить полимерный материал с высокой электрической проводимостью в качестве проводящего компонента применяют порошки мелкодисперсного серебра. Поскольку это достаточно дорогостоящий материал, то в прикладных целях часто используют порошки меди, никеля, алюминия. Однако данные компоненты очень чувствительны к влажности, что, в свою очередь, ведет к нестабильности параметров. Необходимо отметить, что определяющее влияние на проводимость оказывает поверхность рабочих частиц проводящего компонента. В связи с чем, перспективным направлением является получение мелкодисперсных порошков различных металлов, поверхность рабочих частиц которых покрыта серебром.

3.2.3 Связующие компоненты

Связующие компоненты электропроводящего полимерного материала скрепляют и фиксируют структуру проводящего компонента, т.е. обеспечивают диспергирование проводящего компонента, образование электропроводящих цепочек и регулирование толщины диэлектрических прослоек между рабочими частицами, таким образом, сохраняя постоянство электрофизических свойств материала. В качестве связующих компонентов в наполненных полимерах широко применяют такие органические материалы, как синтетические смолы, получаемые путем конденсации ряда непредельных углеводов, а также термопластичные полимеры.

В исходном состоянии (стадия I) смолы представляют собой полимеры с низкой степенью конденсации и небольшой молекулярной массой, легкоплавкие и растворимые, хорошо смешивающиеся с проводящей компонентой обычным механическим путем. После низкотемпературной термической обработки смолы загустевают и переходят в неплавкое состояние, частично сохраняя растворимость (стадия II). При последующей термообработке происходит полимеризация смолы, сопровождающаяся переходом в твердое состояние и потерей растворимости (стадия III). На данной стадии смола представляет собой пространственный полимер с большой молекулярной массой, обладает хорошей химической и влагостойкостью. В процессе полимеризации смолы происходит рост электрической проводимости, конечное значение которой зависит от исходного состояния и вида смолы, а также режима поляризации.

В технологии производства наполненных полупроводниковых и электропроводящих полимеров широко используются следующие смолы:

- фенолформальдегидные - продукты поликонденсации фенола C_6H_5OH с формальдегидом H_2CO ;
- полиэфирные - продукт поликонденсации различных спиртов и кислот;
- эпоксидные - различаются по способам химического синтеза, но все содержат эпоксидные группы C_2H_4O ;
- кремнийорганические.

В качестве связующих компонентов часто используют термопластичные полимеры такие, как: полиэтилен (C_2H_4), поливинилхлорид (C_2H_3Cl), политетрафторэтилен (C_2F_4), а также полиамиды, полиимиды и полиакрилаты. Все выше перечисленные полимеры имеют те или иные преимущества или недостатки, т.е. отличаются по нагревостойкости, пластичности, химической и влагостойкости, что позволяет получать материалы с заданными свойствами в достаточно широком диапазоне отдельных параметров.

Наполнители вводятся в электропроводящие полимеры для улучшения тех или иных механических характеристик, а также для повышения нагрево- и влагостойкости. В качестве наполнителей обычно применяют корундовые микропорошки, окиси ряда металлов (титана, циркония), сернокислый барий, тальк, слюдяную муку, белую сажу (окись кремния), фарфоровую муку, кварцевый песок и т.п. Применение волокнистых материалов (асбеста, стекловолна и т.п.) также улучшает ряд параметров наполненных полимеров, однако затрудняет структурообразование проводящих частиц. Содержание в полимерах наполнителя колеблется от 30 до 60 %. Введение наполнителей часто преследует цель снижения стоимости материала, поскольку наполнители обычно дешевле полимеров. Необходимо, однако, иметь в виду, что взаимодействие полимеров с наполнителями представляет собой сложные физико-химические процессы. Было например показано, что добавление в растворы или расплавы полимеров ничтожных количеств микроскопических частиц с кристаллической структурой и «активной» поверхностью ведет к появлению зародышей кристаллизации. В ряде случаев наполнители могут выполнять также роль антиоксидантов.

3.3 Свойства наполненных полимеров

Основные электрические характеристики наполненных полимеров обычно близки к параметрам проводящих компонентов. Поэтому наполненные полимеры можно рассматривать в первом приближении, как систему проводящих частиц, совокупность контактных сопротивлений, между которыми обуславливает сопротивление материала в целом.

Существует несколько типичных структур проводящих полимерных материалов:

- плотно упакованная;
- цепная;
- островковая.

Удельное объемное сопротивление плотно упакованной однородной системы зависит от соотношения диаметров проводящих частиц и контактных пятен (областей соприкосновения частиц), а при определенном давлении в системе просто растет с увеличением твердости материала. Сопротивление также увеличивается с повышением степени дисперсности проводящего компонента.

Относительный объем проводящего компонента в плотно упакованной однородной системе $\geq 0,52$. Когда относительный объем проводящего компонента меньше данного значения, происходит образование цепной или островковой системы. В случае цепной структуры частицы образуют электропроводящие цепочки в полимере. Электропроводящая островковая система образуется, когда между частицами проводящего компонента появляются зазоры, заполненные связующим компонентом, т.е. диэлектрическим полимером.

Электрические свойства наполненного полимера зависят от преобладания той или иной проводящей системы, а также от их сочетания. В целом можно выделить несколько характерных систем, которые отличаются по реализующимся в них механизмам проводимости и характеризуются:

- плотными контактами, сопротивление которых представляет собой сопротивление растекания (система I);
- контактами через тонкие прослойки или зазоры, когда реализуется туннельный механизм проводимости (система II);
- проводящими частицами, разделенными диэлектрическими прослойками толщиной более 2 нм и образующими внутреннюю емкость композиционного проводника (система III)[77] .

При уменьшении удельного объема проводящих частиц удельный объем систем II и III увеличивается, а системы I уменьшается.

3.4 Исходные компоненты для изготовления модельного диэлектрика

В настоящей диссертационной работе в лабораторных условиях проводилось изготовление композитного диэлектрического материала на основе насыщенного углеводорода (парафина или церезина) и наноразмерного проводящего порошка графитированной сажи с выбранной оптимальной величиной удельной объемной электропроводности для проведения исследований в тестовых экспериментах.

3.4.1 Диэлектрик парафин нефтяной

Парафин нефтяной это воскоподобное вещество белого цвета кристаллического строения, с молекулярной массой 300-450, в расплавленном состоянии обладает малой вязкостью. Величина и форма кристаллов парафина зависят от условий его выделения: из нефти парафин выделяется в виде мелких тонких кристаллов, а из нефтяных дистиллятов и дистиллятных рафинатов селективной очистки – в виде крупных кристаллов. При быстром охлаждении выделяемые кристаллы мельче, чем при медленном.

Химическая формула: смесь предельных углеводородов (алканов) состава от $C_{18}H_{38}$ до $C_{35}H_{72}$.

Парафин инертен к большинству химических реагентов. Он окисляется азотной кислотой, кислородом воздуха (при $140^{\circ}C$) и некоторыми другими окислителями с образованием различных жирных кислот, аналогичных жирным кислотам, содержащимся в жирах растительного и животного происхождения.

Получают парафин преимущественно путем депарафинизации и обезмасливания дистиллятного масляного сырья с использованием кетон-ароматических растворителей. В меньших масштабах твердый парафин производят обезмасливанием без растворителей – фильтр-прессованием охлажденного сырья с последующим потением полученного газа. Для

получения товарных продуктов обезмасленные парафин подвергают очистке: серно кислотной, контактной, перколяционной, гидрогенизационной.

По степени очистки твердые нефтяные парафины подразделяют на высокоочищенные и очищенные [78] П-1 - высокоочищенный парафин, применяется при изготовлении тары и упаковочных материалов жесткой конструкции, клеев и расплавов, имеющих соприкосновение с пищевыми продуктами и применяемых при повышенных температурах, при изготовлении косметических препаратов и в фармацевтической промышленности.

П-2 - высокоочищенный парафин, применяется для покрытия и пропитки гибкой упаковки пищевых продуктов, сохраняющей эластичность при пониженных температурах, а также в качестве компонентов сплавов для покрытия деревянных, бетонных, металлических емкостей, предназначенных для хранения пищевых продуктов; в производстве различных восковых составов, изделий медицинской техники и косметических препаратов.

В2, В3, В4, В5 - высокоочищенные парафины, предназначены для использования в различных отраслях промышленности, предъявляющих особые требования к чистоте изделий, в частности марка В2 может применяться для изготовления резинотехнических изделий.

Т-1, Т-2, Т-3, С - очищенные парафины технического назначения, предназначены для использования, как правило, в качестве сырьевых материалов в различных отраслях промышленности:

Т-1 - применяется для изготовления товаров бытовой химии, в частности свечей, и в других отраслях народного хозяйства;

Т-2 - применяется для использования в химической, нефтехимической промышленности и в других отраслях народного хозяйства;

Т-3 - применяется для пропитки и покрытий технических сортов бумаги, картона, текстиля, деревянных и металлических поверхностей; допускается применение в нефтехимической промышленности;

С - применяется в нефтехимической промышленности для производства синтетических жирных кислот.

Физические свойства очищенных твердых нефтяных парафинов П-2, Т-1, Т-2 и Т-3 ГОСТ 23683-89 приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Наименование показателя	Значение для марки			
	П-2	Т-1	Т-2	Т-3
Внешний вид	Кристаллическая масса белого цвета	Кристаллическая масса белого цвета, допускаются оттенки серого или желтого		
Температура плавления, °С, не ниже	52,0	52,0-58,0	52,0-56,0	50,0-56,0
Массовая доля масла, % не более	0,80	1,80	2,30	3,00
Электропроводность, Ом ⁻¹ м ⁻¹	10 ⁻¹⁸ ... 10 ⁻¹⁴	-	-	-
Запах	Отсутствие	-	-	-
Содержание бензапирена	Отсутствие	-	-	-
Массовая доля серы, %, не более	Отсутствие	-	-	-
Массовая доля воды, не более	Отсутствие	-	-	0,2
Содержание механических примесей	Отсутствие			
Содержание фенола	Отсутствие	-	-	-
Содержание фурфурола	Отсутствие	-	-	-
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	Отсутствие			

3.4.2 Проводящий наполнитель технический углерод

Технический углерод (сажа) - дисперсный углеродный продукт неполного сгорания или термического разложения углеводородов, состоящий из сферических частиц чёрного цвета. Средний размер сажевых частиц 30—350 нм. Частицы сажи образованы из слоев углеродных атомов, подобных слоям в графите. Эти слои состоят из шестиугольников, в вершинах которых находятся атомы углерода (расстояния между ними 1,42 Ангстрем), но, в отличие от графита, слои в саже не плоские, а изогнутые, что и обуславливает сферическую поверхность частиц. Плотность сажевых частиц около 2 г/см³. Насыпная плотность 0,05—0,5 г/см³, зависит от степени уплотнения сажи.

Сырьём для производства сажи служат природный газ, ацетилен, жидкие углеводороды, а также остатки от перегонки нефти и каменноугольные смолы, содержащие большое количество конденсированных ароматических соединений. По способу производства сажи делят на три группы: канальные, печные и термические.

Канальные (диффузионные) сажи получают при неполном сжигании природного газа или его смеси с маслом (например, антраценовым) в так называемых горелочных камерах, снабженных щелевыми горелками. Внутри камер расположены охлаждающие поверхности, на которых сажа осаждается из диффузионного пламени.

Печные сажи получают при неполном сжигании масла, природного газа или их смеси в факеле, создаваемом специальным устройством в реакторах (печах). Сажа в виде аэрозоля выносится из реактора продуктами сгорания и улавливается специальными фильтрами.

Термические сажи получают в специальных реакторах при термическом разложении природного газа без доступа воздуха.

Выход сажи зависит от вида сырья и её дисперсности (выход тонкодисперсной сажи меньше, чем грубодисперсной). Промышленные сажи

содержат обычно более 98% углерода; 0,2—0,5% водорода; небольшие примеси минеральных веществ и серы; в некоторые специальные сорта входит хемосорбированный кислород (до 10% по массе). Сажа широко применяется во многих отраслях техники. Более 90% всей производимой сажи потребляет резиновая и прежде всего шинная промышленность. Используется в производстве чёрных лаков и эмалей и чёрных печатных красок для полиграфии, употребляется как наполнитель для получения различных изделий из пластмасс, для изготовления копировальной бумаги, крема для обуви, грима, косметических красок и др. В производстве сухих электрических элементов применяется так называемая ацетиленовая сажа (получается при термическом или взрывном разложении ацетилена); она отличается наиболее развитой вторичной структурой и высокой электропроводностью. Технические требования для технического углерода П-803 по ГОСТ 7885-86 приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 Углерод технический П-803 по ГОСТ 7885-86. Технические требования.

Наименование показателей	Нормы по ГОСТу
Удельная условная поверхность, м ² /г	14 - 18
Адсорбция дибутилфталата, см ³ /100 г	86 - 100
РН водной суспензии в пределах	7,5 - 9,5
Потери при нагревании при 105°С, %, не более	0,5
Зольность %, не более	0,2
Массовая доля остатка после просева через сито с сеткой не более:	
0045 по ГОСТ 6613-86 (%)	0,08
05 по ГОСТ 6613-86 (%)	0,001
014 по ГОСТ 6613-86 (%)	0,01

3.5 Отработка технологии изготовления композитного диэлектрического материала

Модельный диэлектрик с заданным удельным электрическим сопротивлением 10^9 Ом·м был получен путем смешивания высокоочищенного парафина П-2 и технического углерода (сажи) П-803, размер частиц здесь составляет порядка 25-150 нм. Такое сочетание обусловлено высокой технологичностью и вместе с тем, простотойготавливаемых образцов. Основной задачей такой системы было получить модельные образцы с заданной повторяемостью электрофизических параметров.

Стакан с парафином помещался на подогреваемую магнитную мешалку. После расплавления, в стакан помещался магнит и соответствующая процентному отношению навеска технического углерода. В течение получаса происходило перемешивание. Следует отметить, что в ходе экспериментальных работ наилучшая повторяемость результатов электрофизических свойств полученных образцов была достигнута при

однократном первичном добавлении сажи, а не путем добавления навесок в уже приготовленный модельный диэлектрик. Полученный образец для исследований электрофизических характеристик представлял собой плоский конденсатор с охранным кольцом из алюминия согласно требованиям к измерительным электродам из ГОСТ 6433-71[79] 60 мм, толщина образца 1,5-2 мм. Все экспериментальные работы и измерения проводились на частоте 1 МГц при температуре окружающей среды плюс 25 С. Такая конфигурация образцов (на рисунке 3.1) позволила последовательно проводить измерения как удельного сопротивления образца на постоянном токе, так и измерения его диэлектрической проницаемости на частоте 1 МГц при помощи измерителя иммитанса Е7-20.

Полученные зависимости приведены на рисунках 3.3 – 3.6. Измерения удельного объемного сопротивления образца проводилось косвенным методом путем измерения тока через образец при помощи электрометра ВК 2-16 с учетом геометрической формы электродов.

Полученные зависимости показали, что при использовании технического углерода необходимый процент составляет 8-9 % от массовой доли для получения образцов с удельным электрическим сопротивлением 10^9 Ом·м

3.5.1 Образец для проведения измерений

Образец для проведения измерений представляет собой измерительный электрод, состоящий из двух пластины между которыми помещается измеряемый модельный нанопроводящий диэлектрик с заданным значением удельного электрического сопротивления и охрannого кольца и показан на рисунке 3.1



Рисунок 3.1 образец для измерений, помещенный между измерительных электродов

3.5.2 Измерения тангенса угла наклона и емкости образца

Измерения тангенса угла наклона диэлектрических потерь и емкости образца проводились прибором измеритель иммитанса Е7-20, показанном на рисунке 3.2. Измерения проводились по трехэлектродной системе [80], в нормальных условиях при комнатной температуре плюс 25 С. Полученные результаты измерений приведены в таблице 3.4

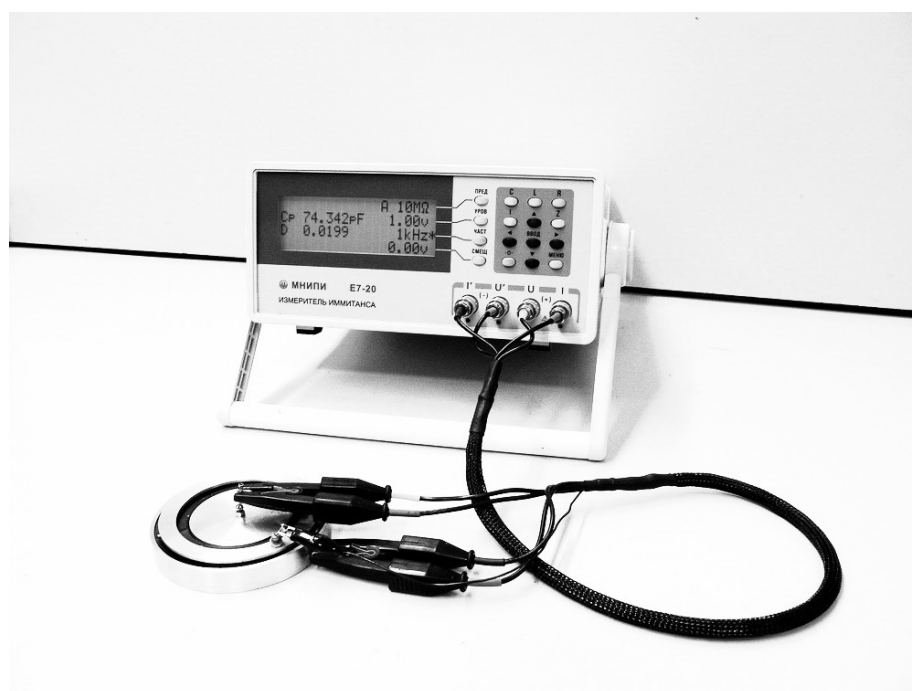


Рисунок 3.2 Измеритель иммитанса Е7-20

Таблица 3.4. Результаты измерения емкости и тангенса угла наклона диэлектрических потерь для образцов с различным содержанием проводящего компонента

	0 процентов Чистый парафин		2 процента		3 процента		4 процента	
Частота, кГц	С, пФ	tg D	С, пФ	tg D	С, пФ	tg D	С, пФ	tg D
1	35,7	0,002	49,5	0,0045	50,8	0,0112	58,3	0,007
2	35,7	0,0021	49,4	0,0015	50,6	0,0054	58,1	0,0034
5	35,6	0,002	49,3	0,0042	50,3	0,0101	58	0,0081
10	35,6	0,0015	49,35	0,0038	50,2	0,01	57,9	0,0072
20	35,6	0,0022	49,2	0,005	49,9	0,0121	57,7	0,0081
50	35,6	0,0013	49	0,0043	49,5	0,0136	57,5	0,0086
100	35,6	0,0021	49	0,0051	49,3	0,0171	57,4	0,0102
200	35,6	5E-4	48,7	0,0041	48,9	0,0187	57,1	0,0099
500	35,6	5E-4	48,9	0,0045	48,5	0,0218	57,1	0,0118
1000	37	0,0028	50,8	0,0085	50,1	0,0288	59,2	0,0175
	5 процентов		6 процентов		7 процентов		8 процентов	
Частота, кГц	С, пФ	tg D	С, пФ	tg D	С, пФ	tg D	С, пФ	tg D
1	91,3	0,02	123,6	0,0343	242	0,0785	233	0,0789
2	93,2	0,023	122	0,0368	234	0,0814	225	0,0848
5	95,9	0,025	119,5	0,0438	222	0,0911	213	0,0939
10	94,6	0,028	117	0,0471	213	0,0991	203	0,1005
20	93,4	0,033	115	0,0526	203	0,1103	194	0,1081
50	91	0,037	111	0,0608	188	0,1263	180	0,1193
100	89	0,041	108	0,0681	178	0,1387	172	0,1268
200	88	0,046	105	0,0756	167	0,1502	162	0,1344
500	85,2	0,054	100	0,0845	151	0,1625	148	0,1462
	9 процентов		10 процентов					
Частота, кГц	С, пФ	tg D	С, пФ	tg D				
1	663	0,2484	1233	0,247				
2	605	0,23	1088	0,2971				
5	537	0,225	884	0,3234				
10	488	0,2327	766	0,3123				
20	440	0,2477	677	0,298				
50	376	0,275	579	0,2924				
100	329	0,296	510	0,3038				
200	285	0,3125	443	0,3249				
500	234	0,3249	359	0,3533				
1000	205	0,3452	298	0,3712				

Данные из таблицы 3.4 сведены в графики на рисунках 3.3-3.6

На рисунке 3.3 представлен результаты измерений тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от добавленного процента сажи в образце, а на рисунке 3.4 увеличенный фрагмент зависимостей для малого процента проводящей добавки

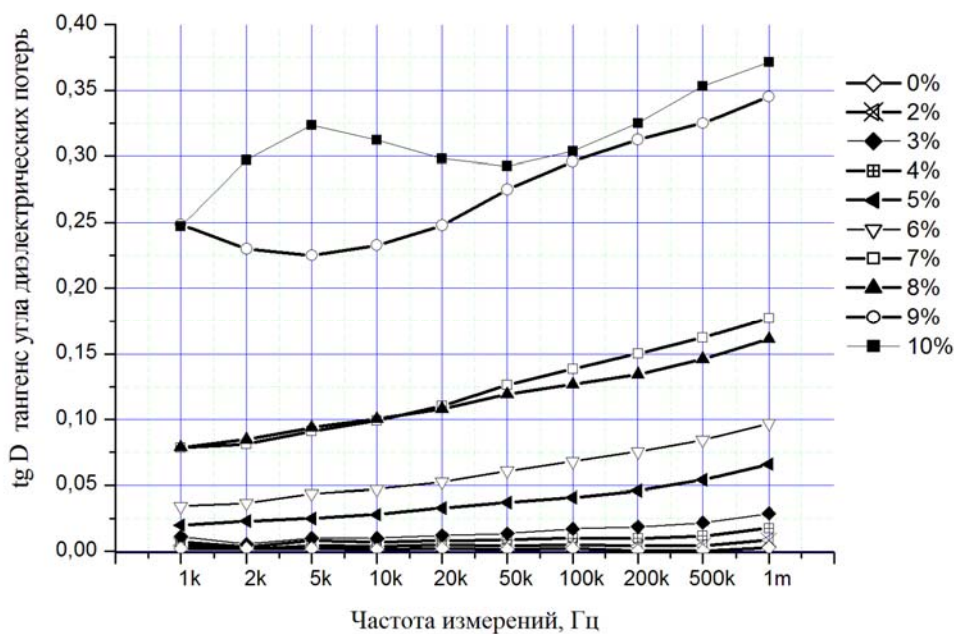


Рисунок 3.3 Зависимость тангенса потерь от частоты измерений при разной процентной доле добавки в диэлектрик

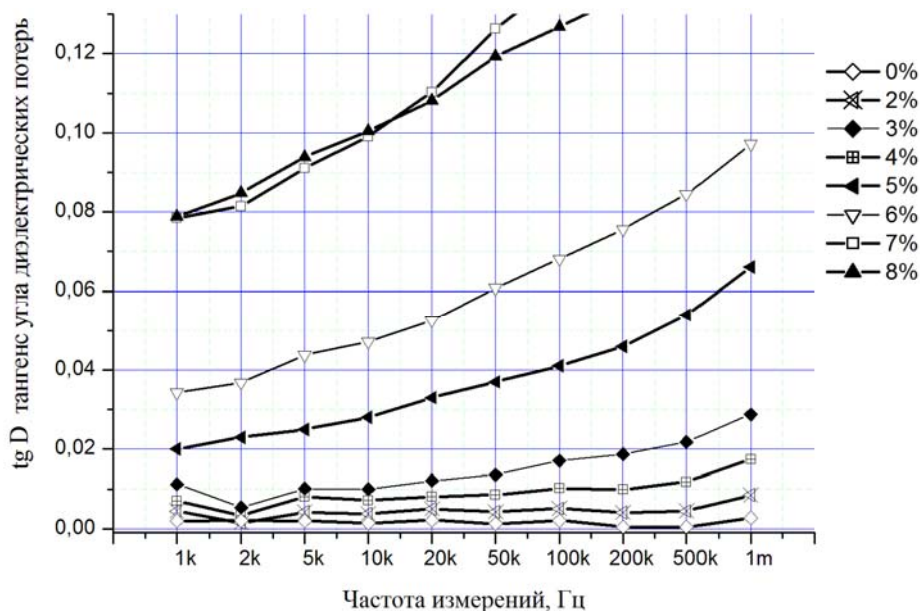


Рисунок 3.4 Зависимость тангенса диэлектрических потерь от частоты измерений при малой процентной доле добавки в диэлектрик

На рисунках 3.5 и 3.6 представлены результаты измерений емкости полученного образца в зависимости от измерительной частоты.

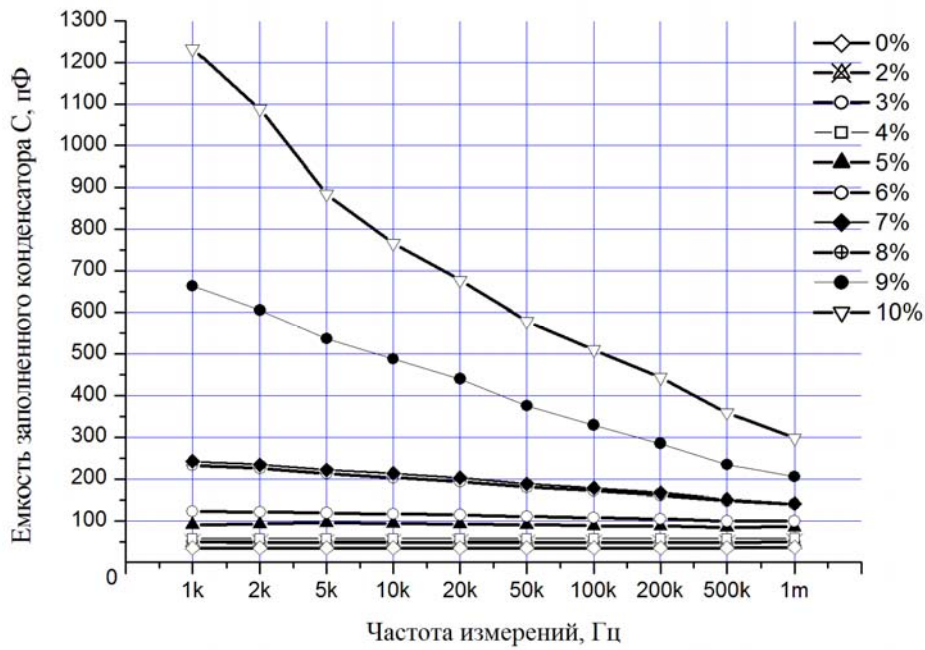


Рисунок 3.5 Зависимость емкости полученного образца от измерительной частоты

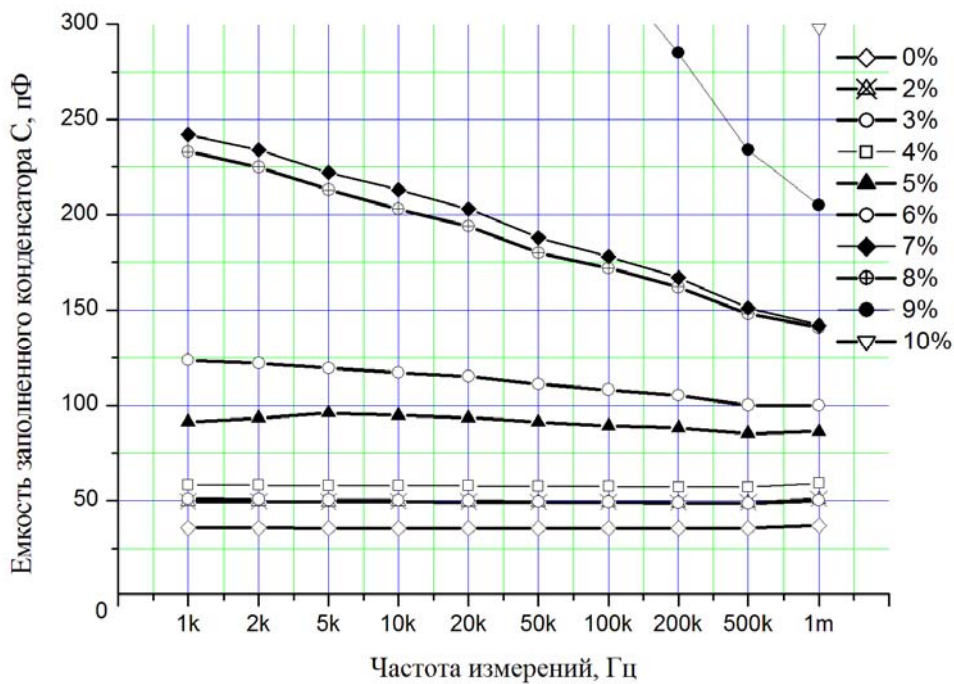


Рисунок 3.6 Зависимость емкости полученного образца от измерительной частоты для малой доли добавки сажи

Относительная диэлектрическая проницаемость среды посчитана двумя разными способами для частоты измерителя 1 МГц:

$$1) \varepsilon_1 = \frac{C_{\text{заполненный}}}{C_{\text{воздух}}} \quad (3.1)$$

Этот метод не учитывает того, что трудно повторить одинаковую толщину образца в условиях его быстрого застывания.

$$2) \varepsilon_2 = \frac{C_{\text{заполненный}} \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot S} = \frac{C_{\text{заполненный}} \cdot d}{27,36 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \quad (3.2)$$

Полученные данные сведены в таблицу 3.5 и представлены на рисунке 3.7

Таблица 3.5 Расчет относительной диэлектрической проницаемости образца по формулам (3.1) и (3.2)

Процент	d, мм	C воздух, пФ	C заполнен, пФ	$\varepsilon_1 = \frac{C_{\text{заполненный}}}{C_{\text{воздух}}}$	$\varepsilon_2 = \frac{C_{\text{заполненный}} \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot S}$
0	1,6	20	37	1,85	2,44491
2	1,5	20	50,8	2,54	3,14699
3	2	15	50,1	3,34	4,13817
4	1,5	20	59,2	2,96	3,66736
5	1,4	20	86,1	4,305	4,97819
6	1,5	20	99,8	4,99	6,18248
7	1,5	20	142	7,1	8,79671
8	1,6	20	141	7,05	9,31708
9	1,6	20	205	10,25	13,54611
10	1,8	17	298	17,52941	22,15284
Измерения емкости образца проведены при частоте 1 МГц					

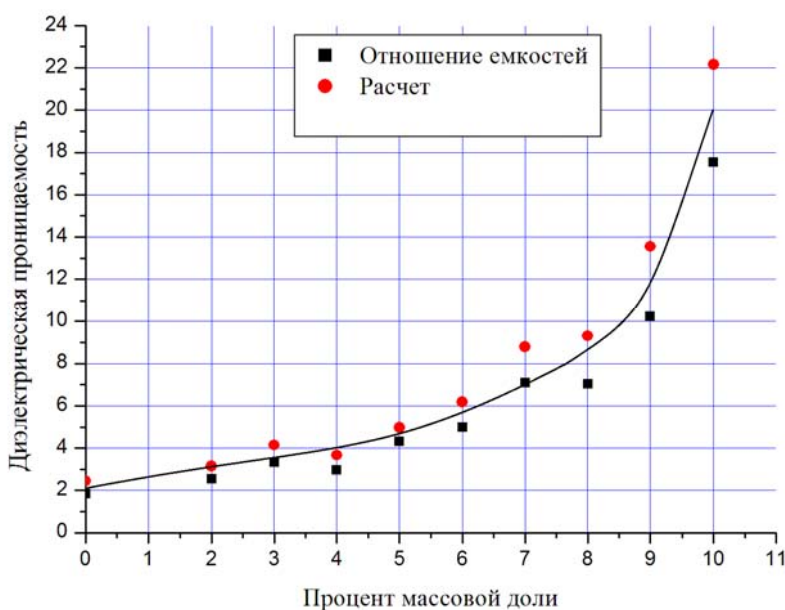


Рисунок 3.7 Зависимость диэлектрической проницаемости от процента добавленной сажи в образец

По результатам измерений показаны зависимости потерь в диэлектрике и характер поведения емкости и диэлектрической проницаемости от количества добавки сажи в модельный диэлектрик. Следующим видом измерений являлось определение проводимости полученных образцов.

3.5.3 Измерение проводимости образца



Рисунок 3.8 Вольтметр электрометрический ВК 2-16

Измерения проводимости образца проводилось косвенным методом путем измерения падения напряжение на известном сопротивлении при помощи прибора ВК2-16 (на рис. 3.8) с последующим пересчетом сопротивления образца

Схема измерений показана на рисунке 3.9:

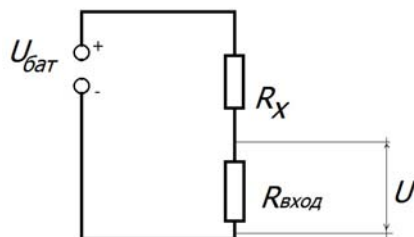


Рисунок 3.9 Схема измерений косвенным методом

Удельное электрическое сопротивление определялось по формуле (3.4), для вычисления по которой выяснялось сопротивление R_x из соотношения (3.3):

$$R_x = \frac{R_{\text{вход.}} \cdot (U_{\text{бат.}} - U)}{U} \quad (3.3)$$

$$\rho = \frac{R_x \cdot S}{d} \quad (3.4)$$

Результаты расчетов сведены в таблице 3.6 и приведены на рисунке 3.10

Таблица 3.6 Результаты расчета удельного электрического сопротивления по произведенным измерениям

	Рассчитанное сопротивление	Удельное электрическое сопротивление
Процент массовой доли	$R_x, \times 10^{10} \text{ Ом}$	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{м}$
2	1903	1,04344E13
3	1167	8,53545E12
4	1222	6,70429E12
5	1078	5,51941E12
6	814	4,46619E12
7	37	2,075E11
8	2,4	1,41667E10
9	0,004	2,53333E7

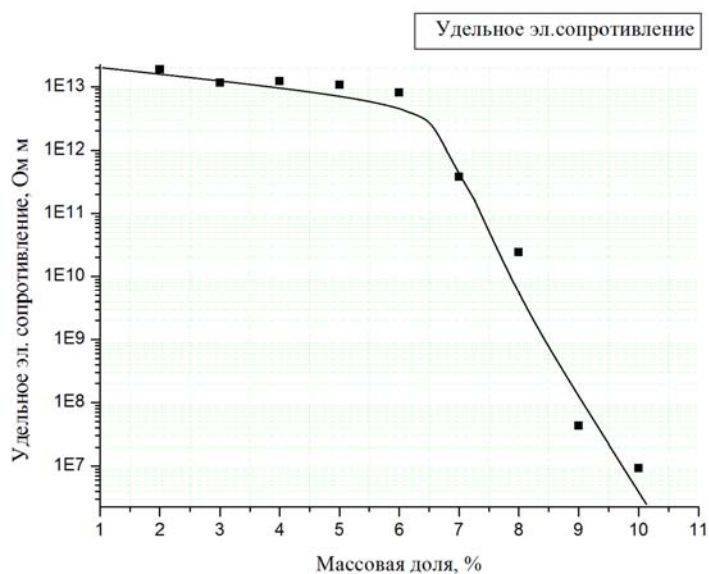


Рисунок 3.10 Зависимость удельного электрического сопротивления от процента массовой доли технического углерода, добавленного в парафин

Одной из проблем при измерениях такого характера, является зависимость электрофизических свойств от температуры, серьезная зависимость от данного параметра была эмпирически выведена в работе [81] В случае же использования диэлектриков, описываемых в настоящем диссертационном исследовании следует учитывать, что приборы бортовой электроники, устанавливаемые на космический аппарат имеют жесткие требования по температурным режимам, нарушение которых недопустимо, а следовательно, и использование слабопроводящего диэлектрика с полученной нанопроводимостью не должно критически сказаться на их функционировании.

В данной главе изложены результаты измерений электрофизических свойств модельного диэлектрика, обладающего нанопроводимостью, на основе сочетания парафин-сажа. Получен результат значения необходимой концентрации проводящей добавки в 7-9 процентов от объёма модельного диэлектрика, результаты обсуждались в [82-84] Следующая глава посвящена влиянию такого нанопроводящего модельного диэлектрика на радиоэлектронную технику в условиях исследовательской лаборатории.

Глава 4 Методика исследования полученного модельного диэлектрика на электризуемость

В этой главе рассмотрена задача выяснения степени электризуемости полученного модельного диэлектрика с заданным значением нанопроводимости. Для этого он исследовался по методике выяснения его электризуемости и помещался в испытательную установку. В установке образец подвергался облучению потоком моноэнергетических электронов, имитирующих воздействие потоков электронов и плазмы космического пространства. Влияние облучения на образцы исследовалось как визуальным

способом – наблюдению наличия возникающих разрядов на поверхности образца, так и с помощью измерительных приборов входящих в состав исследовательской установки. Получено, что в образцах с содержанием добавки более 7 процентов в течение длительного облучения разрядов не возникает.

4.1 Образцы для проведения исследований

Образцы для проведения исследований представляли собой цилиндрические электроды (на рис. 4.1), заполненные модельным диэлектриком с содержанием от 6 до 9 процентов добавленной проводящей части в парафин и образца чистого парафина, без добавки.



Рисунок 4.1 Образцы для проведения исследований

Образцы исследуемого диэлектрика толщиной 2 мм помещались на цилиндрическую алюминиевую подложку толщиной 1 см. Данные образцы помещались в специальную измерительную ячейку, которая является частью исследовательской установки по воздействию потоками моноэнергетических электронов, о которой пойдет речь ниже.

4.2 Установка для исследований

В качестве источников радиации в таких исследованиях с успехом применяются источники низкоэнергетических электронов. Установки для изучения электризуемости полимеров тесно связаны с изучением радиационной электропроводности [64,85] и основаны на базе источников низкоэнергетических (25 кэВ...100 кэВ) электронов обладают целым рядом преимуществ перед установками на базе традиционных источников радиации: гамма-источников Co^{60} , ускорителей электронов до высоких энергий, гамма-нейтронных реакторов и т.п. Установки на низкоэнергетических электронах безопасны в радиационном отношении, не требуют больших и специально оборудованных помещений, менее энергоемки, не нуждаются в многочисленном обслуживающем персонале и при этом обладают целым рядом уникальных технических характеристик, которые, как правило, невозможно реализовать на установках, использующих традиционные источники радиации.

К таким характеристикам относятся:

- возможность изменения мощности поглощенной дозы в широких пределах;
- прямоугольный импульс излучения с легко изменяемой длительностью при работе в импульсном режиме и малое время нарастания при ступенчатом воздействии радиации;
- незначительный уровень электромагнитных помех;
- высокая точность определения мощности поглощенной дозы излучения;
- отсутствие требований к соблюдению условий электронного равновесия при исследованиях и расчете мощности поглощенной дозы.

Именно эти обстоятельства, а также большой опыт использования электронно-лучевых установок в МИЭМ для решения разноплановых исследовательских и технологических задач в рамках научного направления, возглавляемого проф. Арменским Е.В., позволил создать установку на

низкоэнергетических электронах для экспериментального определения физических параметров подвергаемых исследованиям материалов. Следует отметить, что материалы внешней поверхности КА подвергаются воздействию в основном низкоэнергетических электронов. Поэтому для космического материаловедения использование установок на низкоэнергетических электронах — это хорошее приближение к натурным условиям эксплуатации[85,86].

4.3 Исследовательская ячейка для испытаний в установке на электризуемость

Как уже было сказано, основным блоком регистрации данных с исследуемого образца в установке является исследовательская ячейка. С исследовательской ячейки данные поступают непосредственно на АЦП для передачи в ЭВМ. Основная задача этого блока регистрации данных и обеспечение возможности обработки полученной информации в ЭВМ[88]. Для защиты дорогостоящего блока АЦП от пробоя образца в схеме усиления приняты специальные меры по его защите. Общая блок схема и внешний вид представлены на рис 4.2 и 4.3:

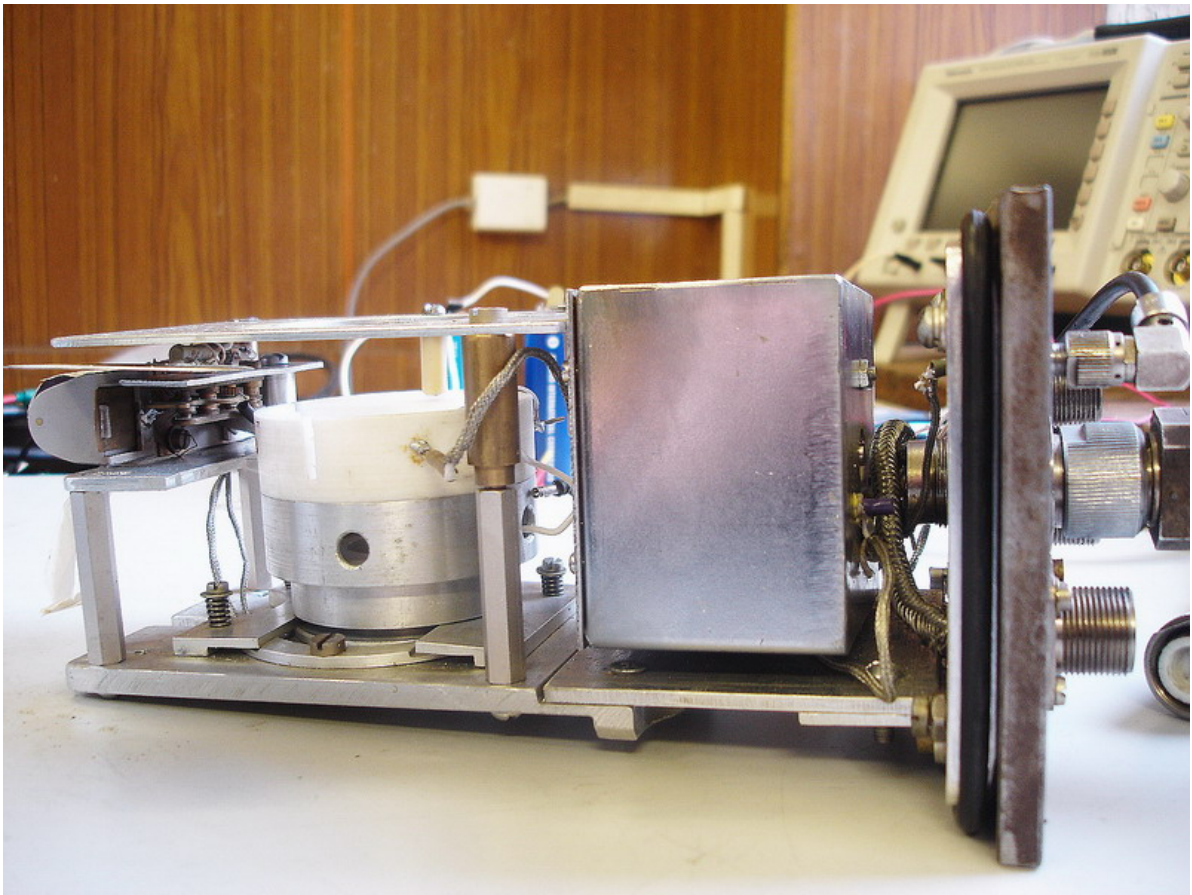


Рисунок 4.2 Внешний вид измерительной ячейки

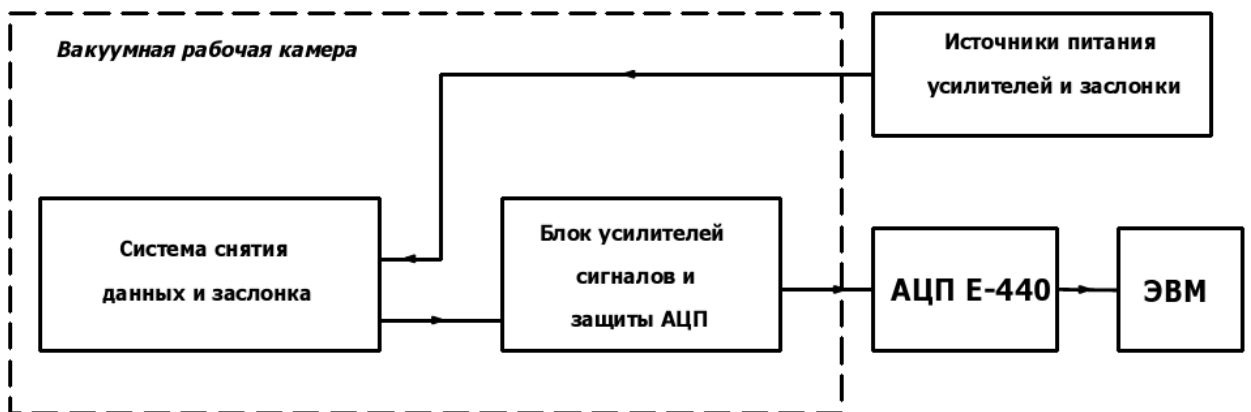


Рисунок 4.3 Блок-схема измерительной ячейки

Динамический вакуум в рабочей камере поддерживается на уровне $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. последовательной работой форвакуумного и диффузионного насосов. Охлаждение ловушки диффузионного насоса жидким азотом позволяет повысить степень вакуума до $7 \cdot 10^{-4}$ Па.

Конструкция измерительной ячейки представлена на рис. 4.4.

Коэффициент обратного отражения электронов от материала заслонки 1 был измерен при помощи цилиндра Фарадея 5 и для всех возможных значений ускоряющих напряжений и токов оказался равным 0,3. Образец полимера 4, вырезанный из пленки с помощью шаблона, представляет собой круг диаметром 40 мм с симметрично напыленными серебряными электродами диаметром 32 мм. Сопротивление напыленных слоев не превышает 5 Ом. Контакт с напыленными электродами обеспечивается при помощи стальных вкладышей и самарий-кобальтовых магнитов. Надежность контактов проверяли после каждой установки образца, измеряя сопротивление между парой магнитов и парой вкладышей.

Кроме того, перед откачкой камеры образцы предварительно испытывали на электрическую прочность при напряженности электрического поля $2 \cdot 10^7$ В/м.

Измерительная система включает в себе диафрагму для контроля поступления электронного пучка и его тока с подсоединенным осциллографом, цилиндр Фарадея с контактами и помещенным внутрь образцом, а также заслонку с подсоединенным к ней питанием и осциллографом первичного контроля пучка.

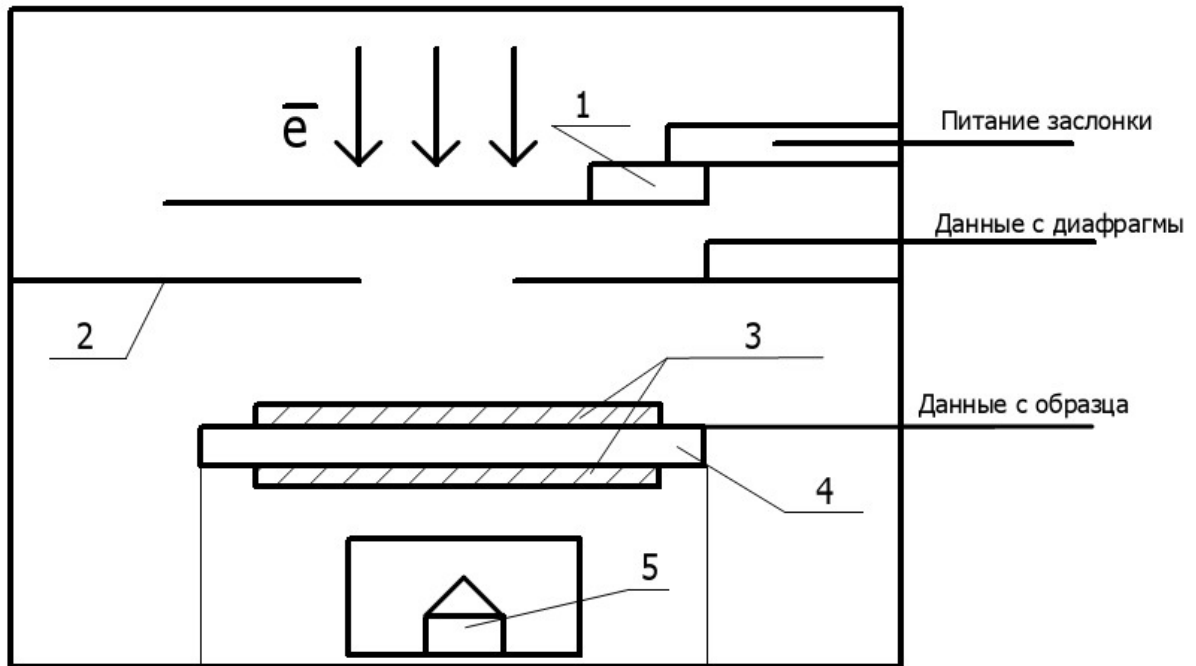


Рисунок 4.4 Поток электронов задерживается заслонкой 1 и ограничивается диафрагмой 2, затем попадая на образец 4 с напыленными серебряными электродами 3 и цилиндром Фарадея 5

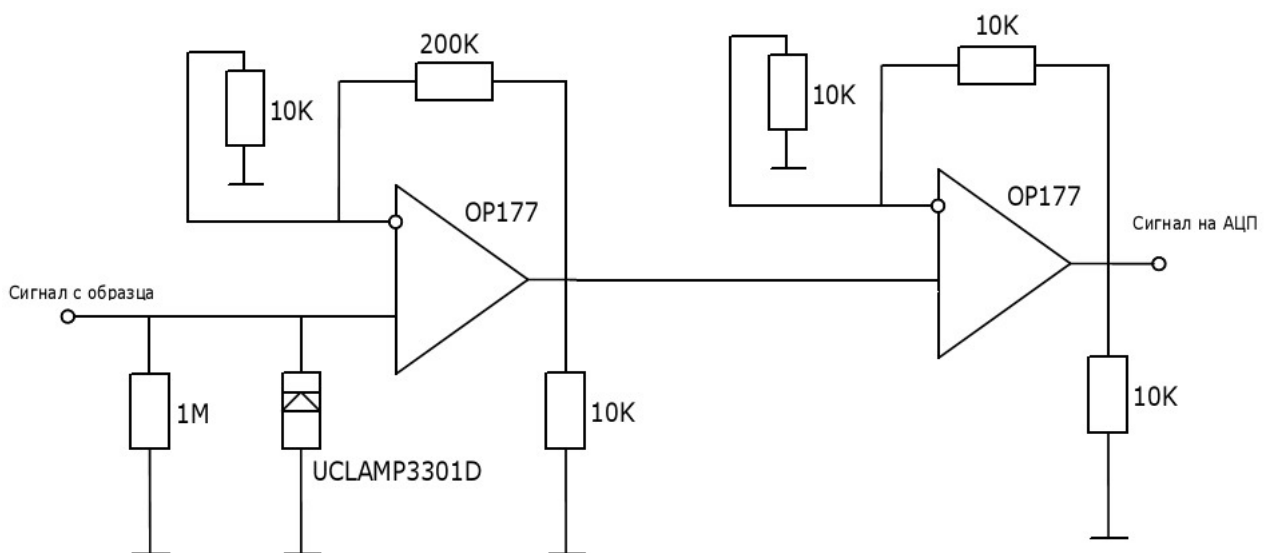


Рисунок 4.5 Схема усилителя сигналов на ОУ OP177 с использованием защитного TVS-диода UCLAMP3301D

Усиление сигнала происходит в отдельном блоке, на микросхемах операционных усилителей, схема представлена на рис 4.5

Операционный усилитель – это дифференциальный усилитель постоянного тока с очень большим коэффициентом усиления и несимметричным входом, всегда подключенный по схеме с обратной связью. В нашем случае используется усиление по напряжению в схеме с инвертирующим подключением. Коэффициент усиления задается парой сопротивлений в схеме подключения [89]. В теории, он мог бы быть сколь угодно большим, однако это невозможно – операционный усилитель не сможет усилить сигнал больше уровня подаваемого на него напряжения питания.[90] Современные ОУ предъявляют достаточно гибкие требования по питанию, нами были выбраны прецизионные усилители OP177 фирмы Analog Devices. Два усилителя подключены последовательно, таким образом первый работает как усилитель с коэффициентом усиления 20, а второй, как повторитель – с коэффициентом 1. Микросхемы на плате находятся непосредственно в вакуумной камере в полностью заэкранированном корпусе, ввиду этого питание подается через отдельный разъем. Внешний вид приведен на рисунке 4.6.

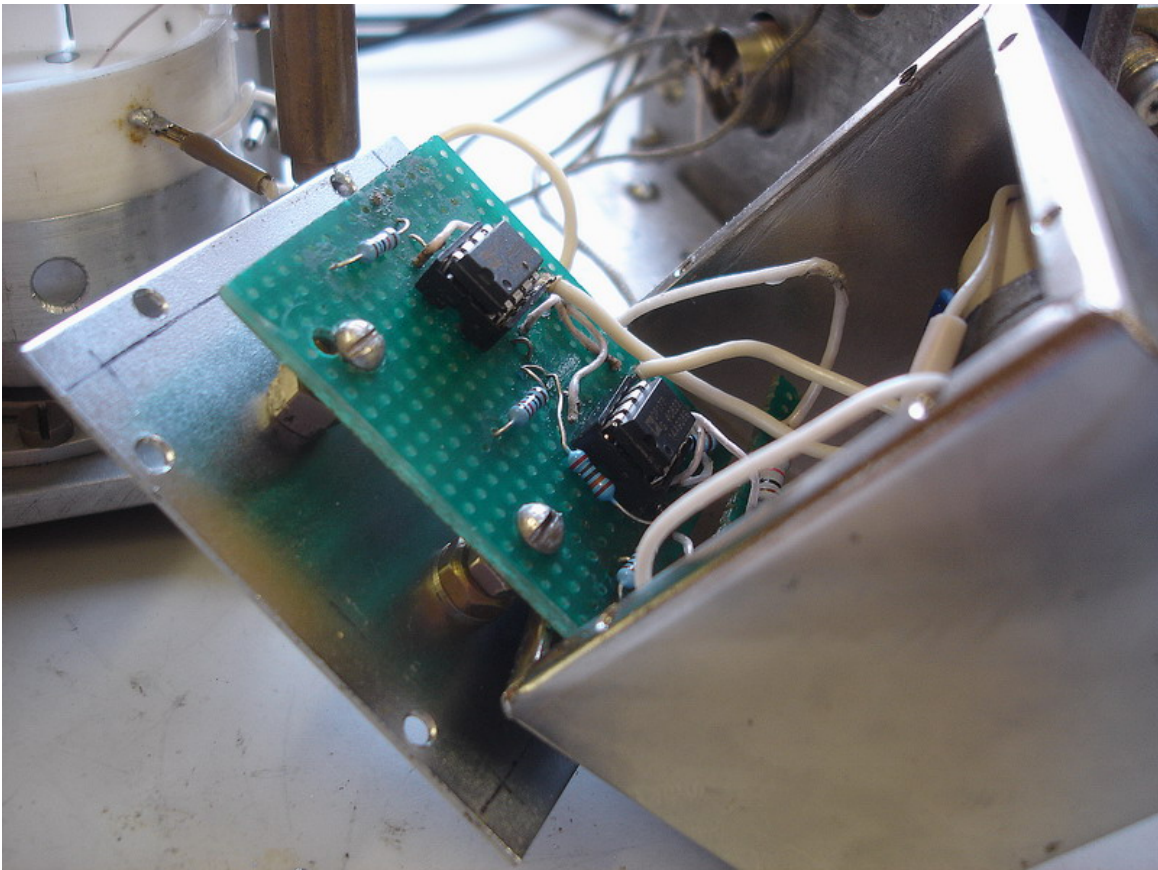


Рисунок 4.6. Блок усиления сигналов в экране

Для защиты микросхем и АЦП был использован TVS (transient voltage suppression)-диод UCLAMP3301D [91]. Полупроводниковые TVS-диоды — полупроводниковые приборы с резко выраженной нелинейной вольт-амперной характеристикой, подавляющие импульсные электрические перенапряжения, амплитуда которых превышает напряжения лавинного пробоя диода.

В нормальном рабочем режиме TVS-диод должен быть «невидим», то есть не влиять на работу защищаемой цепи до момента возникновения импульса перенапряжения. Электрические характеристики TVS-диода не должны оказывать никакого влияния на нормальное функционирование цепи.

Во время действия импульса перенапряжения TVS-диод ограничивает выброс напряжения до безопасного [92], в то время как опасный ток протекает через диод на землю, минуя защищаемую цепь. Не следует путать

TVS-диоды с кремниевыми стабилитронами (диодами Зенера). TVS-диоды разработаны и предназначены для защиты от мощных импульсов перенапряжения, в то время как кремниевые стабилитроны предназначены для регулирования напряжения и не рассчитаны на работу при значительных импульсных нагрузках.

TVS-диод обладает высоким быстродействием в отличие от газоразрядных ограничителей (разрядников), которые из-за значительного времени срабатывания (более 0,15 мкс) не решают проблемы защиты многих полупроводниковых приборов и микросхем, поскольку для них недопустимы начальные выбросы напряжения, пропускаемые разрядниками.

Преимуществом TVS-диодов перед разрядниками является еще то, что напряжение пробоя у них ниже напряжения ограничения (у разрядников оно значительно выше напряжения поддержания разряда), поэтому при их применении защищаемые ими цепи не шунтируются после прохождения импульса тока переходного процесса, как это имеет место у разрядников.

4.4 Исследование материалов путем их облучения моноэнергетическими потоками

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 сотрудниками. [93–96]. 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 расщепленного 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 пленок, облучаемых моноэнергетическими электронами с энергией 20-30 кэВ со стороны открытой поверхности (тыльный электрод заземлялся) [97]. 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 [98].

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.

4.5 Методика исследований на электризуемость

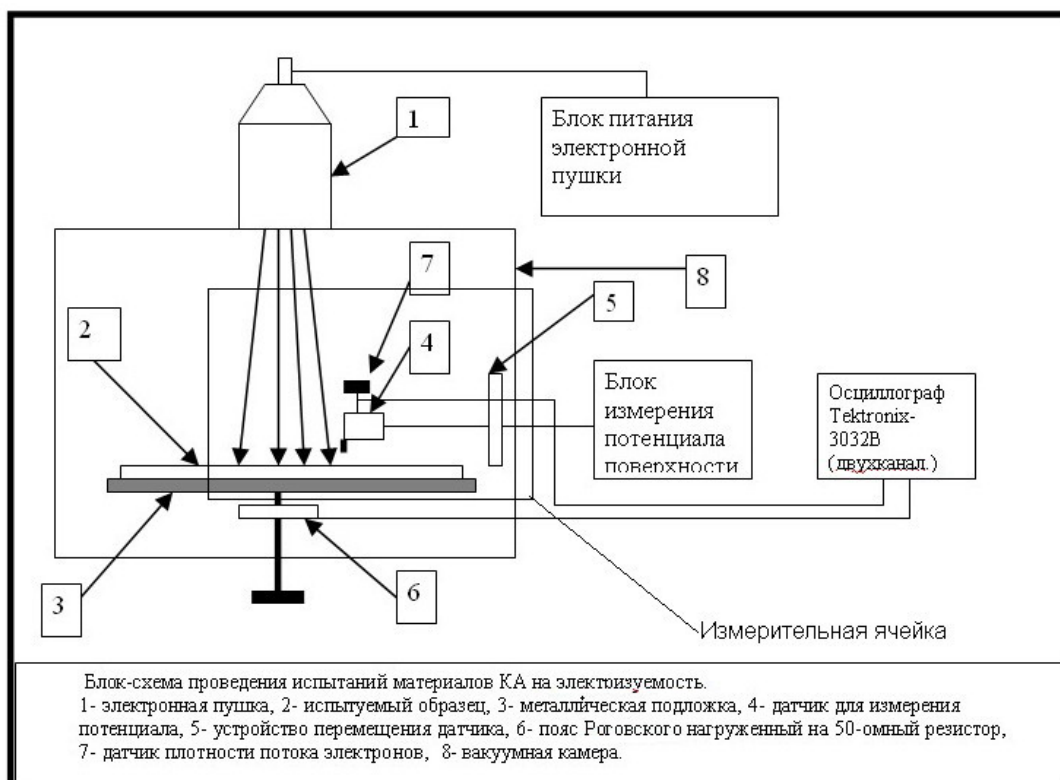


Рисунок 4.7 Многофункциональная установка для исследований материалов на электризуемость

Разработанная методика испытаний образцов на электризуемость состоит из следующих этапов или отдельных операций, показанных на рисунке 4.7.

- а) На металлическую подложку (3) устанавливается образец (2) испытываемого материала. При этом принимаются исчерпывающие меры по качественной металлизации всех проводящих элементов этого образца.
- б) Осуществляется откачка вакуумной камеры (8) для достижения требуемого значения вакуума $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт ст.
- с) Устанавливается требуемая энергия и плотность тока пучка электронов для электронной пушки (1). Для полного учета методических факторов измеряется распределение плотности тока пучка электронов в плоскости образца. С этой целью при помощи несложного приспособления (5) перемещается цилиндр Фарадея (7) с

ограничивающей диафрагмой диаметром 2 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях по радиусу электронного пучка и регистрируется ток цилиндра в различных точках. Неравномерность плотности пучка по площади образца не превышает 25 % в рабочей области, что вполне удовлетворяет поставленным задачам.

- d) Через интервалы времени 10с, 20с и 60с проводятся измерения поверхностного потенциала (4,5). Датчик для измерения потенциала поверхности выполнен на основе динамического конденсатора и имеет возможность перемещения в требуемую точку над поверхностью облучаемого образца конструкционного материала. При этом определяется время достижения максимального потенциала.
- e) Облучение каждого образца проводится в течение 30 минут, при этом автоматически фиксируются ЭСР на поверхности образца. Количественные измерения параметров ЭСР проводятся с помощью пояса Роговского (6), нагруженного на 50-омный резистор и подключенного к одному из каналов осциллографа Tektronix-3032В. Пояс Роговского (бесконтактный трансформаторный датчик тока) предназначен для бесконтактного измерения быстро изменяющегося (импульсов) тока в проводнике [99,100]
- f) Погрешность измерения величины поверхностного потенциала не превышает 10%, параметры ЭСР определяются с погрешностью 20%.

В результате экспериментальных работ получено, что значение поверхностного потенциала всех образцов модельных диэлектриков не превысило 20 В, разряды ЭСР не наблюдались, в отличие от сравнительных тестов с чистым диэлектриком (парафином), где наблюдались выраженные разряды с частотой 2-5 раз в минуту уже к третьей минуте с начала облучения.

Выводы к 4 главе. В экспериментальном исследовании было выяснено, что полученный диэлектрик в условиях имитирующих

космическое ионизирующее облучение и воздействие плазмы не был подвержен ЭСР. Условия, подобные космическим были созданы потоком низко энергетических электронов на специальной установке, подробная схема которой представлена в главе. В результате опытный образец диэлектрика оказался не подвержен ЭСР.

ГЛАВА 5 Экспериментальное исследование влияния полученного диэлектрика на параметры печатной платы

5.1 Влияние покрытия на частоту генерации прямоугольного сигнала

В заключительной главе диссертации показан метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к ЭСР, основанный на замене традиционных диэлектриков печатных плат диэлектриками, обладающими нанопроводимостью и исключающими возможность возникновения ЭСР, а также выполнена экспериментальная проверка метода и приведены результаты внедрения метода в процесс проектирования и производства бортовой радиоэлектронной аппаратуры космической техники. Экспериментальные работы проходили в два этапа. На первом этапе в работе использовалась специально разработанная для генерации сигнала микросхема SN74S124[101] (аналог К531ГГ1) представляющая собой сдвоенный мультивибратор, генерирующий на выходе прямоугольные импульсы напряжения типа «меандр». Частота этих импульсов задавалась путем расчета навесных элементов, или путем подачи напряжения на соответствующие управляющие входы микросхемы. В качестве имитации печатной платы, к микросхеме дополнительно присоединялись провода, имитирующие дорожки печатной платы. Измерения проходили в два этапа: на собранную схему подавалось питание, записывался и запоминался результат. На втором этапе, не меняя ничего в схеме физически, а также не изменяя ее местоположения, схема погружалась в полученный слабопроводящий диэлектрик целиком. Его удельное электрическое сопротивление составило $3 \cdot 10^9$ Ом·м с процентом массовой

доли сажи в 8,5 процентов. Также снимались данные на цифровой запоминающий осциллограф.

Было получено, что на частоту генерируемого импульса данное покрытие не повлияло, максимальное изменение частоты в рамках одного этапа измерений – с 37 до 34,4 МГц (рисунок 5.1).

Казалось бы рабочая частота микросхемы в 37 МГц будет недостаточно для современных цифровых устройств, однако краткий обзор открытых источников о разрабатываемой бортовой аппаратуре, применяемой на КА, такой как блоки передачи и обработки телеметрической информации, а также бортовые цифровые вычислительные машины используют отечественные разработки микросхем и процессоров, с рабочей частотой 10-50 МГц [103]. Так, например разработка НТЦ «Модуль», большая интегральная схема (БИС) 1879ВА1Т[103] имеет задаваемую тактовую частоту 12/16 МГц – это универсальная связная машина мультиплексного канала обмена, а также микросборка на базе К2605ВГ1Т в радиационно-стойком исполнении [104]. В настоящий момент на космических аппаратах российского производства используется магистральный последовательный интерфейс (мультиплексный канал обмена, передачи данных), протокол передачи и обмена данных описанный в соответствующих нормативных документах[102]. Скорость передачи данных при этом составляет 1 Мбит/с.[102-104] В современных космических аппаратах зарубежного производства применяется более быстрый и помехоустойчивый протокол LVDS сетевого стандарта SpaceWire, разработку которого координирует Европейское космическое агентство (ЕКА). Этот протокол предпочтителен для применения в научной аппаратуре космического аппарата, за счет более высокой пропускной способности – до 400 Мбит/с. Как следует из официального сайта Федерального космического агентства России, в разделе открытых конкурсов на заключение контрактов можно найти информацию о внедрении этого стандарта и на КА российского производства: «Разработка базовых элементов экспериментальной системы космического назначения,

включающую аппаратуру, поддерживающую стандарт SpaceWire». Шифр: ОКР «Устройство» (Химки)[105].

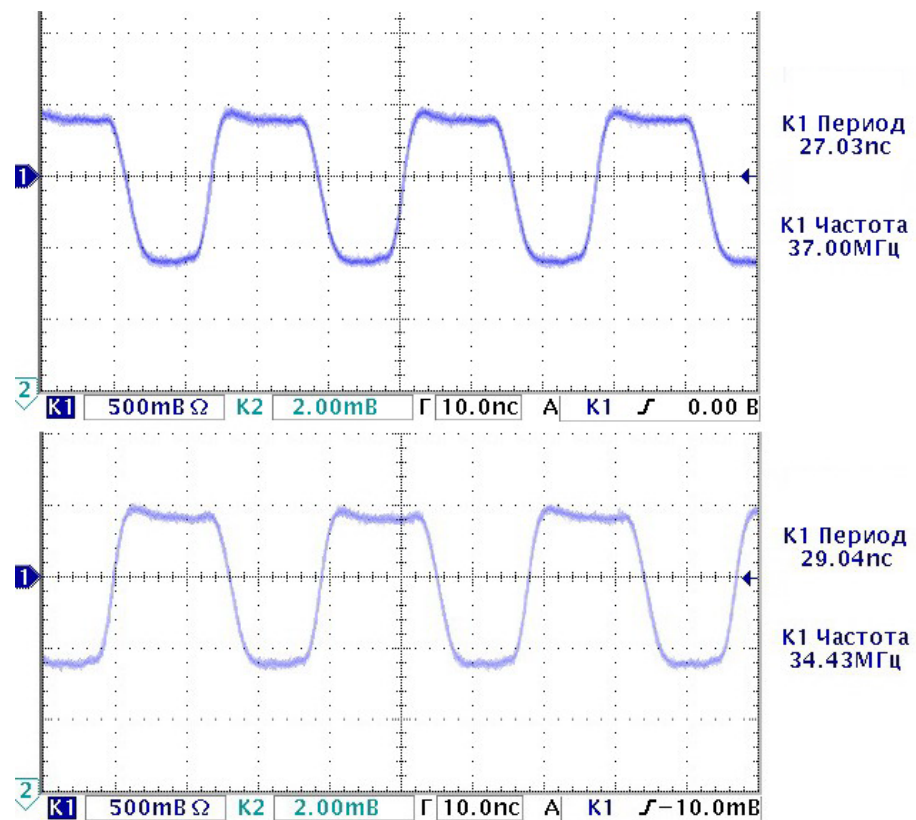


Рисунок 5.1 Выходной сигнал с мультивибратора не погруженного (верхний график) и погруженного (нижний график) в нанопроводящий диэлектрик

5.2 Измерение скорости передачи данных между двумя ПК используя высокоскоростную сеть передачи данных

На втором этапе работ проводились измерения скорости передачи данных через типовую печатную плату. Измерение скорости передачи данных происходило между двумя персональными компьютерами (ПК) используя высокоскоростную сеть передачи данных со скоростью 100 Мбит/с (технология Ethernet в локальной сети IEEE 802.3u Fast Ethernet.) Процесс измерений проводился в следующем порядке.

Два ПК соединяются кабелем типа «витая пара» длиной 2 метра, категория кабеля – 5. Объектом исследования является сетевая карта, подключаемая в слот PCI одного из ПК.

С помощью специализированного программного обеспечения (ПО) `iperf`[106], работающего через командную строку, и более удобной русскоязычной версии с графическим интерфейсом-надстройкой, написанной на языке Java – `jperf` измерялась скорость передачи данных. Измеряется скорость передачи и приёма данных сетевой картой в ПК «Б» посредством витой пары, соединенной с ПК «А». В ПК «А» находится также сетевая карта, на всем протяжении измерений без каких-либо изменений.

Данное ПО состоит из двух частей типа «клиент-сервер», запускаемых на разных ПК. Запустив серверную (на рисунке 5.3) на первом ПК, а клиентскую части (на рисунке 5.2) на втором ПК, ПО обеспечивает передачу пакетов данных в режиме заполнения всей доступной полосы пропускания по скорости. Эта скорость зависит от типа кабеля и плат в обоих ПК. Среднее выводится по результатам пяти последовательных измерений.

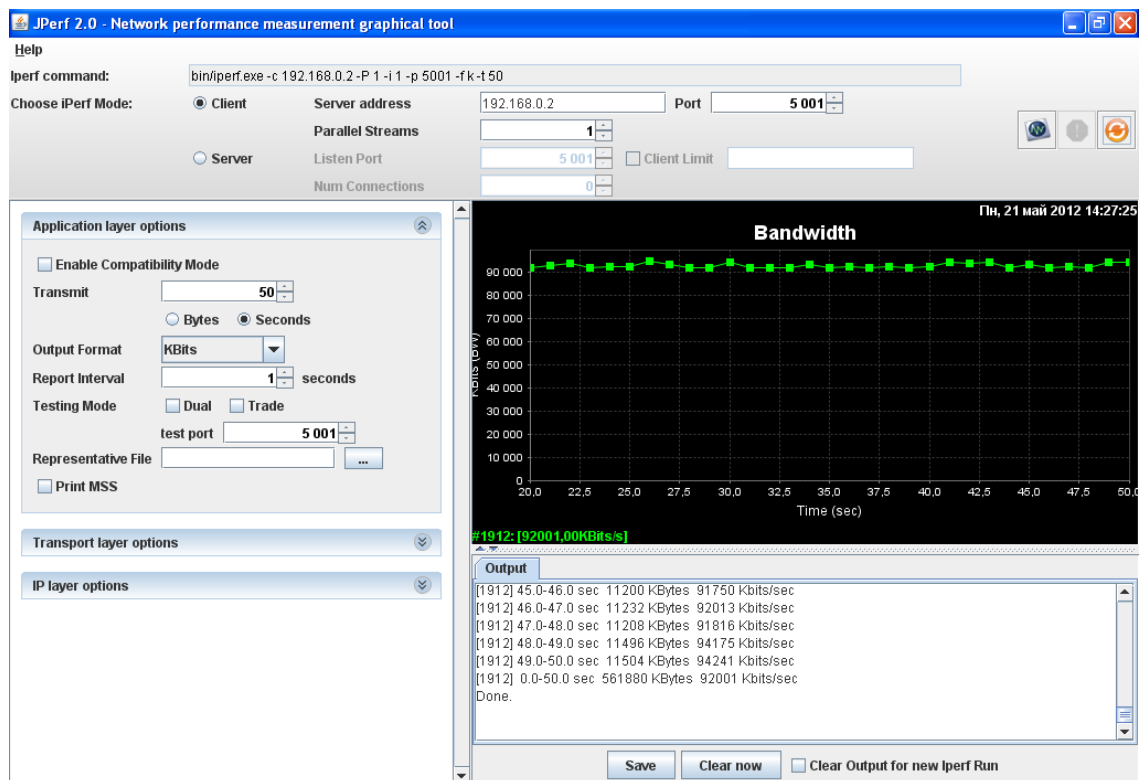


Рисунок 5.2 Общий вид клиентской части программы `jperf` по завершении измерений

```

C:\WINDOWS\System32\cmd.exe
C:\Documents and Settings\All Users\Документы\скорость сети\jperf-2.0.0>C:\iperf
.exe -s
-----
Server listening on TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
[1908] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1101
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[1908] 0.0-10.0 sec   109 MBytes   90.9 Mbits/sec
[1896] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1102
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[1896] 0.0-10.0 sec   109 MBytes   90.9 Mbits/sec
[1888] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1103
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[1888] 0.0-10.0 sec   109 MBytes   91.4 Mbits/sec
[1900] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1105
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[1900] 0.0-10.0 sec   109 MBytes   90.9 Mbits/sec
[1876] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1106
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[1876] 0.0-10.0 sec   109 MBytes   91.1 Mbits/sec
-----

```

Рисунок 5.3 Общий вид серверной части программы jperf по завершении измерений

Суть измерений состоит в определении влияния на скорость передачи данных состояния печатной платы сетевой карты и состоит из трех этапов:

1) Измерение скорости передачи данных через плату с нанесенным заводским способом защитным эпоксидным лаком со стороны выводов, полигонов «земли» печатного монтажа.

2) Измерение скорости передачи данных через плату с удаленным защитным покрытием из лака.

3) Измерение скорости передачи данных через плату с удаленным защитным покрытием лака, взамен которого нанесено покрытие из нанопроводящего модельного диэлектрика.

Здесь следует отметить, что удаление штатного эпоксидного лака оказалось нетривиальной задачей, с которой не смог справиться ни один из известных растворителей, в том числе специализированных для эпоксидных красок. Поэтому лаковое покрытие было удалено механическим способом, мелкозернистой шлифовальной бумагой, что видно на рисунке 5.4.

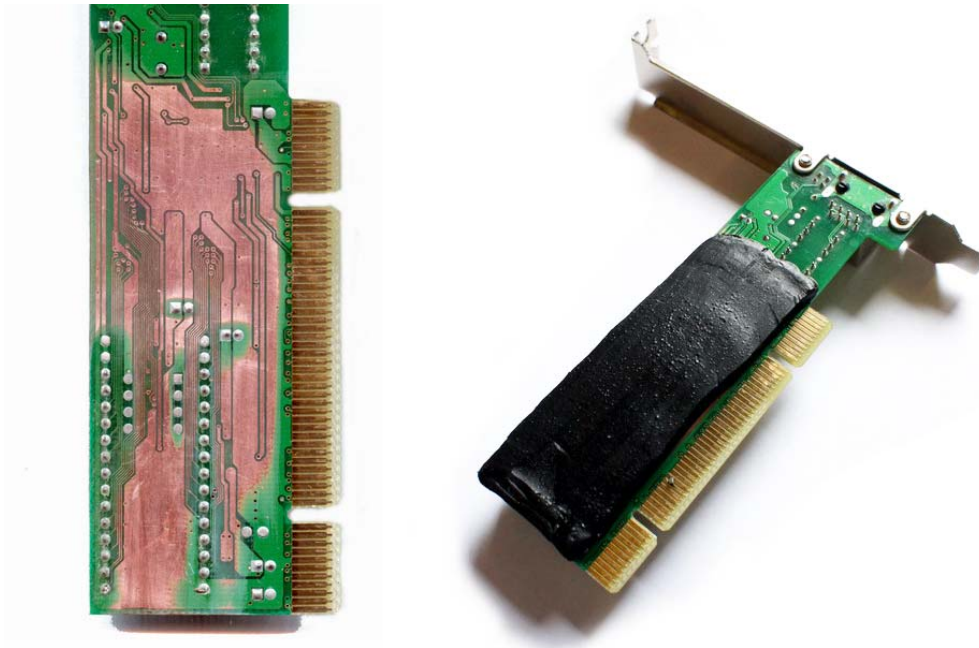


Рисунок 5.4 Внешний вид печатной платы со снятым защитным лаковым покрытием (слева) и с покрытием из модельного диэлектрика, обладающего нанопроводимостью (справа)

Итак, данное ПО генерировало строго однонаправленные информационные пакеты, что показали неоднократные тесты в самых разнообразных конфигурациях служебного (системного) программного обеспечения, для исключения его влияния на производительность обработки и передачи информации поступающей или передаваемой через сетевые платы. В результате более 50 сеансов передачи и приёма было получено, что состояние при сравнении работы платы без лакового покрытия и с покрытием из нанопроводящего модельного диэлектрика не влияют на скорость передачи данных (в рамках одного этапа пяти последовательных сеансов передачи информационных пакетов), максимальная достигнутая скорость – 91 Мбит/с. Подробный листинг работы обеих частей в текстовом формате по результатам одного сеанса передачи информации между печатными платами приведен в Приложении А

Таким образом, полностью оправдано применение нанопроводящего диэлектрика в печатной плате, на это техническое решение получен патент на полезную модель RU 114816 U1 от 10.04.2012. Получен патент на

изобретение «Печатная плата для бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов» RU 2 497 319 C1 от 29.10.2013 года.

Выводы к 5 главе.

Таким образом, была выполнена экспериментальная проверка новых образцов диэлектриков, произведённых в предшествующих этапах работы, обладающих низким уровнем электризуемости и практическим отсутствием ЭСР и приведены результаты внедрения метода повышения устойчивости печатных узлов БРЭА к разрядам статического электричества в процесс проектирования и производства бортовой радиоэлектронной аппаратуры космической техники. Были осуществлены экспериментальные работы, которые проходили в два этапа, основная задача которых было установить, как влияет новое такой модельный диэлектрик в качестве покрытия печатных плат на передачу сигнала. Первый этап был связан с изучением этой проблемы при помощи специально разработанной для генерации сигнала микросхемы SN74S124 (аналог К531ГГ1) представляющей собой сдвоенный мультивибратор, генерирующий на выходе прямоугольные импульсы напряжения типа «меандр». В качестве имитации печатной платы, к микросхеме дополнительно присоединялись провода, имитирующие дорожки печатной платы. Результаты измерений показали, что на частоту импульса новое покрытие не оказало практически никакого влияния.

На втором этапе работ проводились измерения скорости передачи данных через типовую печатную плату. Измерение скорости передачи данных происходило между двумя персональными компьютерами (ПК) используя высокоскоростную сеть передачи данных со скоростью 100 Мбит/с (технология Ethernet в локальной сети IEEE 802.3u Fast Ethernet.) . При замене стандартного покрытия печатной платы на новое скорость передачи импульсов не изменилась. Таким образом, новое покрытие печатных плат, характеризуемое практическим отсутствием ЭСР, не ухудшило параметры печатной платы в виде частоты импульса и скорости

его передачи. В итоге необходимо сделать вывод о возможности внедрения данного метода повышения устойчивости путем использование диэлектрика, обладающего нанопроводимостью, непосредственно в конструкции печатных плат к ЭСР, что подтверждено патентом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует иметь ввиду, что исследование воздействия космического излучения на полимерные диэлектрики – это комплексная проблема, имеющая фундаментальное значение для различных практических областей применения.

Во-первых, это вопросы устойчивости полимерных диэлектриков к воздействию ионизирующих излучений, как в военной технике, так и в ядерной энергетике.

Во-вторых, это проблема защиты космических аппаратов от поражающих факторов электризации.

И, наконец, в-третьих, это развитие техники и технологии процессов записи, хранения и считывания информации, включая тривиальный в настоящее время принтер или ксерокс.

Эти важнейшие технические приложения предъявляют различные требования к изменению электрофизических характеристик полимерных диэлектриков при воздействии света или радиации. Так полимерная изоляция проводов и кабелей на объектах военной техники и ядерной энергетике не должна значительно увеличивать свою электропроводность при воздействии радиации. В противном случае возрастание токов утечки может превысить допустимый предел.

При проектировании защиты космических аппаратов от поражающих факторов электризации, напротив, требуется повышенная электропроводность полимерных диэлектриков внешней поверхности для обеспечения хорошего стока зарядов из объема диэлектрика на его поверхность без электростатических разрядов. Именно электростатические разряды оказывают негативное влияние на функционирование бортовой аппаратуры космических аппаратов.

Разработка техники и технологий записи, хранения и считывания информации требует от полимерных диэлектриков хорошей фотопроводимости. Часто это требование ужесточается применением света только видимого диапазона длин волн.

Такие разнообразные, порой взаимоисключающие требования к полимерным диэлектрикам делают фундаментальные исследования в этой области весьма перспективными. Действительно, только глубинные знания электрофизических процессов протекающих в облучаемых полимерах, позволяют разрабатывать полимерные диэлектрики с заранее заданными свойствами. Поэтому существенное значение в настоящей диссертационной работе имеют не только создание нового диэлектрика и экспериментальное подтверждение его качеств, но и детальный анализ различных путей преодоления нежелательных эффектов ионизирующего излучения на БРЭА. В диссертационной работ получены следующие результаты.

1. Выполнен обзор и анализ существующих методов защиты БРЭА космических аппаратов от процессов внутренней электризации и сопровождающих ее электростатических разрядов. На основе анализа сформулировано новое направление для устранения внутренней электризации БРЭА КА. Это направление предполагает использование в составе печатных узлов КА диэлектриков, обладающих нанопроводимостью.

2. Проведено компьютерное моделирование работы типового цифрового устройства – мультивибратора для обоснования возможности замены традиционных диэлектриков печатного узла на диэлектрики,

обладающие нанопроводимостью и исключают возможность возникновения электростатических разрядов при электронном облучении.

3. Разработана методика и изготовлен модельный диэлектрик, обладающий требуемым значением удельной объемной электропроводности для исключения возможности возникновения электростатических разрядов при электронном облучении.

4. Разработана методика и выполнены тестовые эксперименты по определению электризуемости модельного диэлектрика под действием электронного облучения в вакууме, в условиях близких к натурным условиям эксплуатации.

5. Показано, что применение обладающего нанопроводимостью диэлектрика в печатной плате (сетевой карте ПК) не ухудшает работу цифрового устройства и одновременно исключает возможность возникновения ЭСР при использовании такой печатной платы в БРЭА КА.

6. Разработан метод повышения устойчивости печатных узлов БРЭА космических аппаратов к ЭСР, основанный на применении диэлектриков печатных плат обладающих нанопроводимостью и исключают возможность возникновения ЭСР.

7. На разработанную в диссертации печатную плату космического применения получены 2 патента. Патент на полезную модель RU 114 816 U1 от 10.04.2012 и патент на изобретение «Печатная плата для бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов» RU 2 497 319 C1 от 29.10.2013 г. Результаты работы используются в процессе проектирования и в виде выдачи адаптированных требований на разработку бортовой радиоэлектронной аппаратуры космической в НПО им. С.А. Лавочкина.

Литература

1. Garrett H.B. The Charging of Spacecraft Surfaces // Review of Geophysics and Space Physics. — 1981. — V. 19. — № 4. — P. 577–616.
2. Акишин А.И., Новиков Л.С. Физические процессы на поверхности искусственных спутников Земли. — М.: Изд-во МГУ, 1987.
3. Милеев В. Н., Новиков Л. С. В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике солнца. Вып.86. — М.: Наука, 1989. — С. 64–98.
4. Акишин А.И., Новиков Л.С. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. — М.: Знание, Космонавтика, астрономия, 1983. — № 4. — 64 с.
5. Попов Г.В., Бабкин Г.В., Дегтярев В.И., Пахомов В.А., Флоридов А.А., Кутявин В.А., Графодатский О.С., Морозов Е.П., Скрыбышева 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.
6. 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).
7. 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. — Vol. NS–23. — № 6. — P. 4502–4504.
8. Тютнев А.П. , Ванников А.В. , Мингалеев Г. С. Радиационная электрофизика органических диэлектриков. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. 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.
10. Белик Г.А. Деградация полимерных покрытий космических аппаратов в результате протекания электростатических разрядов./ Научно-

техническая конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тезисы докладов. // Ред. кол.: В.Н. Азаров, М.В. Карасев, Л.Н. Кечиев и др. — М.: МИЭМ, 2010. — С. 255–256.

11. Звонарь В., Чеботарев В. Новое качество спутниковой навигации. // Информационные спутниковые системы. — 2011. — №11. — С. 12–13.

12. Mitigating in-Space Charging Effects – A Guideline. NASA–HDBK – 4002A. [Электронный ресурс] // NASA Technical Standards Program: сайт. — URL: <https://standards.nasa.gov/documents/detail/3314877> (дата обращения 23.08.2012) /

13. Пожидаев Е.Д., Саенко В.С. Смирнов И.А., Бабкин Г.В., Морозов Е.П., Тютнев А.П., Флоридов А.А., Доронин А.Н. Повышение стойкости космических аппаратов к воздействию поражающих факторов электризации // Космонавтика и ракетостроение — 2003. — Вып. 1(29) — С. 32–35.

14. 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.

15. Безродных И.П., Казанцев С.Г., Семёнов В.Т. Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. — 2010. — Т.116. — С. 23–26.

16. Шилов А.Е., Волков С.Н., Безродных И.П., Семенов В.Т. Радиационные условия для высокоорбитальных космических аппаратов в период максимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. — Т.115. — 2010. — С. 47–52.

17. Vette , J. I. The AE-8 Trapped Electron Environment // NSSDC / WDC-A-R&S, 1991.

18. Jensen, P. L., Clausen, K., Cassi, C., Ravera, F., Janin, G., Winkler, C., Much, R. The INTEGRAL spacecraft – in-orbit performance // Astronomy and Astrophysics. — 2003. — Vol. 411. — P. L7–L17.

19. Артемов М.Е. Радиационные условия при полете космических аппаратов по сложным эволюционирующим орбитам в радиационных поясах

земли. // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. — 2010. — № 8. — С. 22–25.

20. ESTAR: Stopping Powers and Ranges for Electron. [Электронный ресурс] // National Institute of Standards and Technology, Physical Measurement Laboratory. — URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/method.html> (дата обращения 24.12.2013).

21. Кондратьева Т.В. Моделирование параметров движения космических аппаратов и внешних условий космического пространства в процессе наземных испытаний звездных координаторов. — М.:Изд-во ИКИ, 2005. — 18 с.

22. Зубавичаус В., Сунцов С. Дизайн-центр – перспектива приборного производства ОАО «ИСС». // Информационные спутниковые системы. — 2011. — №12. — С. 26-27.

23. 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.

24. SWPC Real-time Monitor Displays [Электронный ресурс] // NOAA – Space Weather Prediction Center: сайт. — URL: http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/index.html (дата обращения 29.10.2013).

25. Бабышкин В.Е. Инновационный гидрометеорологический космический комплекс «Электро» нового поколения. // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина — 2011. — №1. — С. 3–8.

26. Показания прибора СКЛ-Э КА "Электро-Л" №1. [Электронный ресурс] // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова: сайт. — URL: <http://ipg.geospace.ru/electro-l1-skl.html> (дата обращения 24.12.2013).

27. Акишин А.И., Новиков Л.С., Космическое материаловедение, Энциклопедия Московского университета. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына. / Под общей редакцией профессоров М.И.Панасюка, Е.А.Романовского и В.И.Саврина. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. — С. 55–64.

28. 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. XIII Congr. YAF, Noth. Holl. Publ. Co 1968. — P. 279–291.

29. 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.

30. Стародубцев В.А. Радиационная электризация диэлектрических материалов // Известия Томского политехнического университета. — 2000. — № 300(3). — С. 22–31.

31. Стародубцев В.А., Фёдоров Б.В. Изменение напряженности внешнего электрического поля фосфатных стёкол, заряженных потоком электронов // Изв. Вузов СССР. — 1976. — № 9. — С. 132–133.

32. Акишин А.И., Новиков П.С. Электризация космических аппаратов. — М.: Знание, сер. Космонавтика, астрономия, 1985. — № 6. — 73 с.

33. Акишин А.И. Эмиссионные процессы при электрическом пробое радиационно-заряженных диэлектриков // ФХОМ. — 1998. — № 5. — С. 27–30.

34. Акишин А.И. Фрактальный характер явлений при электрическом пробое радиационно-заряженных диэлектриков // ФХОМ. — 1997. — № 3. — С. 17–21.

35. 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.

36. Frederickson A.R. Radiation Induced Electrical Current and Voltage in Dielectric Structures. — AFRL-TR-74-0583. — 1974. — 41 p.

37. Frederickson A.R. Electric Discharge Pulses in Irradiated Solid Dielectric in Space // IEEE Transactions on Electrical Insulation — 1983. — Vol. 18. — P. 337–349.

38. Frederickson A.R., Cotts D.B., Wall J.A., Bouquet F.L. Spacecraft Dielectric Material Properties and Spacecraft Charging // AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics. — 1986. — Vol. 107. — P. 95–100.

39. Frederickson A.R., Holeman E.G., Mullen E.G. Characteristics of Spontaneous Electrical Discharging of Various Insulators in Space Radiations // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1992. — Vol. 39 n. 6. — P. 1773–1782.

40. Frederickson A.R., Mullen E.G., Brautigam D.H., Kerns K.J., Robinson P.A., Holeman E.G. Radiation-induced Insulator Pulses in the CRRES Internal Discharge Monitor Satellite Experiment // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1991. — Vol. 38. — P. 1614–1621.

41. Бабкин Г.В., Вахниченко В.В., Иванов В.А., Левицкий Ю.Е., Лукьященко 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.

42. Avoiding Problems Caused by Spacecraft On-Orbit Internal Charging Effects. NASA-HDBK-4002 — 1999. — 51 p.

43. 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. — 2006. — Vol. 34 — № 5 — P. 1973-1978.

44. 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.

45. Sakaguochi K., Miyoshi Y., Saito S., Nagatsuma I., Murat K.T. Daily-average Relativistic Electron Flux Forecast at Geostationary Orbit Based on Multivariate Autoregressive Model // Space Weather — 2013. — Vol 11, Issue 2 — P. 79–89.

46. Ohara T. Review on Space-based Observation Related to the Space Weather Activities in Japan // 12th Spacecraft Charging Technology Conference 14-18 Mays, 2012 Kitakyushu, Japan.

47. Juan Pablo Gonzalez Marina. Spacecraft Charging Activities in Argentina. / Aerospace & Government Division EMI/EMC Group // 12th Spacecraft Charging Technology Conference 14-18 Mays, 2012 Kitakyushu, Japan.

48. ECSS-E-ST-20-06C Space Engineering, Spacecraft Charging [Электронный ресурс] // European Cooperation for Space Standardization — 2008: сайт. — URL: <http://www.ecss.nl> (дата обращения 12.12.2013).

49. Nikolskiy E., Bakutov A., Grach E., Pakostina A., Belik G., Prokoyev Y. In-flight Charging Measurements of Spacecraft Produced by Lavochkin Association // 12th Spacecraft Charging Technology Conference 14-18 Mays, 2012 Kitakyushu, Japan.

50. Fergusson D., Cooke D., Pfaff R., Rowland D. et al, Ram/Wake and Surface Layer Effects on DC Electric Field Measurements in LEO // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2013. — Vol. 41, Issue 12 — P. 3459–3470.

51. Garrett H.B., Pike C.P. AIAA Symposium on Space Systems and Their Interaction with Earth Space Environment, edited by H. B. Garrett and C. P. Pike // American Institute of Aeronautics and Astronautics— New York, 1980 — Vol. 71.

52. Garret H.B., Hoffman A. Comparison of Spacecraft Charging Environments at the Earth, Jupiter, and Saturn. // 6th Spacecraft Charging Technology Conference, AFRL-VS-TR-20001578, 1 September 2000.

53. Capriani F., Rodgers D., Hilgers A., Erd Ch., Wiolds A. Charging Stimulation of Jupiter Icy Moons Explorer Orbiter with SPIS Software // 12th

Spacecraft Charging Technology Conference 14-18 Mays, 2012 Kitakyushu, Japan.

54. Edwards D.L., Burns H.D., Miller Sh.K., Schnieder T.A., Spann J.F., Xapsos M., Porter R. Space Invironments and Spacecraft Effects Organization Concept // 12th Spacecraft Charging Technology Conference 14-18 Mays, 2012 Kitakyushu, Japan.

55. Garrett, H.B The Charging of Spacecraft Surfaces // Rev. Geophys. — 1981. — Vol. 19 —P. 577–616.

56. Garrett, H.B., Whittlesey A.C. Spacecraft Charging, An Update. // 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit — AIAA 96-0143.

57. Цетлин В.В. Взаимодействие электронов со стеклообразными диэлектриками применительно к радиационной защите космических аппаратов. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. — М.: ГНЦ РФ ИМБП РАН, 1998. — 248 с.

58. Цетлин В.В., Павлушкина Т.К., Редько В. И. Снижение мощности радиационного излучения за слоями заражающихся диэлектриков. М.: АЭ — 1993. — Т. 74, вып. 2 — С. 163–165.

59. Цетлин В.В., Павлушкина Т.К., Милявский В.В., Редько В.И., Кочкин В.Н., Махотин Д.Ю. Радиоэлектреты – материалы для радиационной защиты // Тезисы XVI международной конференции «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество», Эльбрус, 2001.

60. Махотин Д.Ю., Кочкин В.В., Цетлин В.В. Реализация в среде MATLAB алгоритма расчёта характеристик электронного излучения при прохождении через слои вещества, содержащие объёмный электрический заряд // Всероссийская научная конференция «Проектирование и инженерных приложений в среде MATLAB», 28-29 мая 2002 г., сборник трудов. — М.: ИПУ РАН — С. 61–67.

61. Цетлин В.В., Махотин Д.Ю., Кочкин В.Н., Редько В.И. Эффекты снижения радиационных потерь электронов в диэлектриках с объёмным электрическим зарядом // Тезисы конференции по физике взаимодействия

заряженных частиц с кристаллами. Москва, 26-28 мая 2003 года, НИИЯФ МГУ.

62. Махотин Д.Ю. Эффекты накопления объёмного электрического заряда в стеклообразных диэлектриках применительно к проблеме радиационной защиты систем жизнеобеспечения космических аппаратов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. — М.: 2006. — 24 с.

63. 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.

64. Тютнев А.П., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д. Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений. — М.: Наука — 2005. — 453 с.

65. Соколов А.Б. Роль радиационной электропроводности в снижении эффектов электризации внешних диэлектрических покрытий космического аппарата // Технологии электромагнитной совместимости. — 2008. — № 1(24) — С. 34–38.

66. Соколов А.Б., Тютнев А.П. Объёмное заряджение полимеров в условиях воздействия факторов космического пространства // Технологии электромагнитной совместимости. — 2008. — № 2(25). — С. 12–15.

67. Соколов А.Б. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. — М.: 2009. — 42 с.

68. Тютнев А.П., Кочетов И.В., Семенов В.Т. Квалификация электротехнических материалов, проводов и кабелей для применения на внешней поверхности космических аппаратов по критерию радиационной стойкости // Вопросы электромеханики. — Т.126 — 2012. — С. 29–36.

69. Иванов В.А., Морозов Е.П. Внутренняя электризация диэлектрических элементов электрорадиоизделий – коварный фактор воздействия космической среды на бортовую аппаратуру. // Космонавтика и ракетостроение — Т. 1 (66). — 2012. — С. 129–141.

70. Белик Г.А. Проблема внутренней электризации как опасного фактора, влияющего на бортовую аппаратуру космических аппаратов. // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, посвященная 50-летию МИЭМ: Тезисы докладов. / Ред. кол.: В.Н. Азаров, Л.Н. Кечиев и др. — М.: МИЭМ, 2012. — С.229–231.

71. Белик Г.А., Абрамешин А.Е., Саенко В.С. Внутренняя электризация бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости.— 2012.— № 3(42).— С. 5–16.

72. Tyutnev A.P., Saenko V.S., Vannikov A.V., Pozhidaev E.D. Concerning the Radiation-induced surface conductivity in polymers // Phys. stat. sol. (a). — 1984. — Vol.86. — № 2. — P. 709–716.

73. Белик Г.А. Расчетно-теоретическая модель оптимизации величины удельной объемной электропроводности радиодиэлектрика печатной платы космического применения. // Научно-техническая конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тезисы докладов. / Ред. кол.: В.Н. Азаров, М.В. Карасев, Л.Н. Кечиев и др. — М.: МИЭМ, 2011. — С. 208–209.

74. Сохор Ю.Н. Моделирование устройств в LTSpice. Учебно-методическое пособие. Псковск. гос. политехн. ин-т. — Псков: Издательство ППИ, 2008. — 165 с.

75. Дувакина Н.И., Ткачева Н.И. Выбор наполнителей для придания специальных свойств полимерным материалам // Пластические массы — 1989. — № 11.— С. 46–48.

76. Савченко Д.В., Ионов С.Г., Авдеев В.В. Электрофизические и теплофизические свойства композиционных материалов на основе нанокремниевых слоев с низким порогом перколяции. // Материалы

конференции. Rusnanotech'08. Международный форум по нанотехнологиям. — М., 2008 — Т.1. — С. 379–381.

77. Физика электропроводящих полимеров Курс лекций. — Минск, БГУ, 2010. — 89 с.

78. ГОСТ 23683-89. Парафины нефтяные твердые. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2007. — 14 с.

79. ГОСТ 6433.2-71 Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрического сопротивления при постоянном напряжении. — М.: Издательство стандартов, 1994. — 23 с.

80. ГОСТ 22372-77 Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц. — М.: Издательство стандартов, 1983. — 19 с.

81. Соцков В.А., Борисов В.А. Эволюция аттрактора макросистемы в зависимости от концентрации проводящей фазы и температуры. // Журнал технической физики. — 2007. — Том 77. — Вып. 11. — С. 103–108.

82. Абрамешин А.Е., Белик Г.А., Саенко В.С. Исключение внутренней электризации бортовой аппаратуры космических аппаратов путем применения нанопроводящих диэлектриков // В кн.: Труды XXII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 9-14 июля 2012 г.) / Отв. ред.: Г.Г. Бондаренко; под общ. ред.: Г.Г. Бондаренко; науч. ред.: Г.Г. Бондаренко. — М.: ФГБНУ "НИИ ПМТ", 2012. — С. 544–550.

83. Абрамешин А.Е., Белик Г.А., Саенко В.С. Новый метод защиты бортовой аппаратуры космического аппарата от внутренней электризации. // В кн.: Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 24-26 октября 2012 г.). — М.: МОКБ «Марс», 2012. — С. 160-162.

84. Белик Г.А. Метод снижения негативных эффектов внутренней электризации бортовой аппаратуры космических аппаратов. // Научно-техническая конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ НИУ ВШЭ. Тезисы докладов. / Ред. кол.: Тихонов А.Н., В.Н. Азаров, М.В. Карасев, В.П. Кулагин и др. — М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. — С. 202–203.

85. Грач Е.П., Белик Г.А. Лабораторная установка для исследования радиационной электропроводности и подвижности носителей заряда в полимерах. // Труды XIX Международного совещания "Радиационная физика твердого тела" (Севастополь, 31 августа - 6 сентября 2009 г.) Под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф-м.н., проф. Бондаренко Г.Г. — М.: ГНУ "НИИ ПМТ", 2009 г. — С. 548–552.

86. Тютнев А.П., Белик Г.А., Абрамешин А.Е., Саенко В.С. Лабораторное моделирование электризации полимеров потоками низкоэнергетических электронов // Перспективные материалы. — 2012. — № 5. — С. 28–33.

87. Пасынков В.В. Материалы электронной техники. — М.: Высш. шк., 1980. — С.155–160.

88. Белик Г.А. Лабораторная установка для исследования радиационной электропроводности полимеров на базе электронного микроскопа ПЭМ-100. // Труды XX Международного совещания "Радиационная физика твердого тела". / Под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф-м.н., проф.Бондаренко Г.Г. — М.: ГНУ "НИИ ПМТ", 2010 г. — С. 498–502.

89. OP177: Ultraprecision Operational Amplifier Data Sheet (Rev G, 09/2012). [Электронный ресурс] // Analog Devices, Inc: сайт. — URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/OP177.pdf (дата обращения 07.03.2013).

90. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. — М.: Мир, 1986. — Т2. — С.173.

91. Semtech uClamp3301D. Low Voltage μ Clamp™ for ESD and CDE Protection Data Sheet [Электронный ресурс] // Semtech Corporation: сайт. — URL: <http://www.semtech.com/images/datasheet/uclamp3301d.pdf> (дата обращения 17.12.2013).

92. Кадуков А. TVS-диоды – полупроводниковые приборы для ограничения опасных перенапряжений в электронных цепях. // Компоненты и технологии. — 2001. — №1.

93. Gross B., Dow J., Nablo S.V. Charge buildup in electron-irradiated dielectrics // J. Appl. Phys., — 1973. — Vol. 44. — № 6. — P. 2459–2463.

94. Gross B., Sessler G.M., West J.E. Charge dynamics for electron-irradiated polymer-foil electrets // J. Appl. Phys., 1974. — Vol. 45. — № 7. — P. 2841–2851.

95. Тютнев А.П., Ванников А.В., Мингалеев Г.С., Саенко В.С. Электрические явления при облучении полимеров. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 176 с.

96. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 240 с.

97. Spacecraft Charging Technology Conf. / Eds. N.J. Stevens and C.P. Pike. // NASA Conf. Publ. — 1979. — 2182–AFGL–TR–1–0270.

98. Meulenbergh A. Evidence for a new discharge mechanism for dielectrics in a plasma In: Spacecraft charging by magnetospheric plasmas. / Ed. A. Roggen. // Progress in Astronautics and Aeronautics. — 1976. — Vol. 47. — P. 237.

99. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. — 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — С. 164.

100. Воршевский А.А. Электромагнитная совместимость технических средств / А.А. Воршевский, В.Е. Гальперин; СПбГМТУ. — СПб., 2006. — С. 261.

101. SN74S124 (ACTIVE) Dual voltage-controlled oscillators Data Sheet. Rev. April 2004. [Электронный ресурс] // Texas Instruments Incorporated: сайт. — URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74s124.pdf> (дата обращения 23.12.2013).

102. ГОСТ Р 52070-2003 Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2003 — 24 с.

103. Универсальная связная машина (терминал) мультиплексного канала обмена по ГОСТ Р 52070-2003 (ГОСТ 26765.52-87) /MIL-STD-1553B Краткое техническое описание [Электронный ресурс] // НТЦ «Модуль»: сайт. — URL: <http://www.module.ru/upload/files/1879ba1tds10-ru.pdf> (дата обращения 12.12.2013).

104. Миронов Н.Ю, Бойнов В.Н.. Микросборка мультиплексного канала по ГОСТ Р 52070-2003 в радиационно-стойком исполнении. Новые возможности бортового применения // Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)". Сборник трудов. — М., Зеленоград, 2010. — № 1. — С. 247–252.

105. Конкурсы: «Разработка базовых элементов экспериментальной системы космического назначения, включающую аппаратуру, поддерживающую стандарт SpaceWire». [Электронный ресурс] // Федеральное космическое агентство (Роскосмос): сайт. — URL: <http://www.federalspace.ru/2032/> (дата обращения 22.12.2013).

106. Tirumala A., Cottrell L., Dunigan T. Measuring end-to-end bandwidth with Iperf using Web100. [Электронный ресурс] // Proc. of Passive and Active Measurement Workshop, 2003: сайт. — URL: <http://www.csm.ornl.gov/~dunigan/pam.pdf> (дата обращения 24.12.2013).

Приложение А

Листинги пяти последовательных сеансов передачи и приёма данных с двух печатных плат.

Листинг передачи данных с платы А на плату Б 14 мая со снятым защитным лаковым покрытием и покрытием из модельного диэлектрика

```
bin/iperf.exe -c 192.168.0.2 -P 1 -i 1 -p 5001 -f k -t 10
```

```
-----
Client connecting to 192.168.0.2, TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
```

```
[1912] local 192.168.0.3 port 1110 connected with 192.168.0.2 port 5001
[ ID] Interval    Transfer  Bandwidth
[1912] 0.0- 1.0 sec 11368 KBytes 93127 Kbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec 11208 KBytes 91816 Kbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec 11064 KBytes 90636 Kbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec 11096 KBytes 90898 Kbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec 11136 KBytes 91226 Kbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec 11120 KBytes 91095 Kbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec 11368 KBytes 93127 Kbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec 11384 KBytes 93258 Kbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec 11184 KBytes 91619 Kbits/sec
[1912] 9.0-10.0 sec 11328 KBytes 92799 Kbits/sec
[1912] 0.0-10.0 sec 112264 KBytes 91538 Kbits/sec
Done.
```

```
bin/iperf.exe -c 192.168.0.2 -P 1 -i 1 -p 5001 -f k -t 10
```

```
-----
Client connecting to 192.168.0.2, TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
```

```
[1912] local 192.168.0.3 port 1112 connected with 192.168.0.2 port 5001
[ ID] Interval    Transfer  Bandwidth
[1912] 0.0- 1.0 sec 11432 KBytes 93651 Kbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec 11392 KBytes 93323 Kbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec 11144 KBytes 91292 Kbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec 11176 KBytes 91554 Kbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec 11416 KBytes 93520 Kbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec 11200 KBytes 91750 Kbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec 11288 KBytes 92471 Kbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec 11136 KBytes 91226 Kbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec 11184 KBytes 91619 Kbits/sec
```

```
[1912] 9.0-10.0 sec 11208 KBytes 91816 Kbits/sec
[1912] 0.0-10.0 sec 112584 KBytes 91799 Kbits/sec
Done.
```

```
bin/iperf.exe -c 192.168.0.2 -P 1 -i 1 -p 5001 -f k -t 10
```

```
-----
Client connecting to 192.168.0.2, TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
```

```
[1912] local 192.168.0.3 port 1113 connected with 192.168.0.2 port 5001
[ ID] Interval    Transfer  Bandwidth
[1912] 0.0- 1.0 sec 11528 KBytes 94437 Kbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec 11424 KBytes 93585 Kbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec 11152 KBytes 91357 Kbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec 11144 KBytes 91292 Kbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec 11168 KBytes 91488 Kbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec 11160 KBytes 91423 Kbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec 11072 KBytes 90702 Kbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec 11136 KBytes 91226 Kbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec 11120 KBytes 91095 Kbits/sec
[1912] 9.0-10.0 sec 11064 KBytes 90636 Kbits/sec
[1912] 0.0-10.0 sec 111976 KBytes 91445 Kbits/sec
Done.
```

```
bin/iperf.exe -c 192.168.0.2 -P 1 -i 1 -p 5001 -f k -t 10
```

```
-----
Client connecting to 192.168.0.2, TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
```

```
[1912] local 192.168.0.3 port 1114 connected with 192.168.0.2 port 5001
[ ID] Interval    Transfer  Bandwidth
[1912] 0.0- 1.0 sec 11608 KBytes 95093 Kbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec 11424 KBytes 93585 Kbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec 11416 KBytes 93520 Kbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec 11392 KBytes 93323 Kbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec 11136 KBytes 91226 Kbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec 11392 KBytes 93323 Kbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec 11096 KBytes 90898 Kbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec 11432 KBytes 93651 Kbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec 11384 KBytes 93258 Kbits/sec
[1912] 9.0-10.0 sec 11376 KBytes 93192 Kbits/sec
[1912] 0.0-10.0 sec 113664 KBytes 92679 Kbits/sec
Done.
```

```
bin/iperf.exe -c 192.168.0.2 -P 1 -i 1 -p 5001 -f k -t 10
```

```
-----
Client connecting to 192.168.0.2, TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
```

```
[1912] local 192.168.0.3 port 1115 connected with 192.168.0.2 port 5001
[ ID] Interval   Transfer  Bandwidth
[1912] 0.0- 1.0 sec 11528 KBytes 94437 Kbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec 11376 KBytes 93192 Kbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec 11208 KBytes 91816 Kbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec 11064 KBytes 90636 Kbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec 11200 KBytes 91750 Kbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec 11152 KBytes 91357 Kbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec 10976 KBytes 89915 Kbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec 11272 KBytes 92340 Kbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec 11056 KBytes 90571 Kbits/sec
[1912] 9.0-10.0 sec 11176 KBytes 91554 Kbits/sec
[1912] 0.0-10.0 sec 112016 KBytes 91478 Kbits/sec
Done.
```

Ответ серверной части программного обеспечения:

```
-----
Server listening on TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
```

```
[1888] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1110
[ ID] Interval   Transfer  Bandwidth
[1888] 0.0-10.0 sec 110 MBytes 91.7 Mbites/sec
[1908] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1112
[ ID] Interval   Transfer  Bandwidth
[1908] 0.0-10.1 sec 110 MBytes 91.7 Mbites/sec
[1900] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1113
[ ID] Interval   Transfer  Bandwidth
[1900] 0.0-10.1 sec 109 MBytes 91.2 Mbites/sec
[1896] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1114
[ ID] Interval   Transfer  Bandwidth
[1896] 0.0-10.1 sec 111 MBytes 92.6 Mbites/sec
[1888] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.3 port 1115
[ ID] Interval   Transfer  Bandwidth
[1888] 0.0-10.0 sec 109 MBytes 91.4 Mbites/sec
```