

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Абрамешин Дмитрий Андреевич

**Исследование влияния процессов накопления заряда в композитных
полимерных диэлектриках на бортовую электронику космических
аппаратов**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор
Пожидаев Евгений Дмитриевич

Москва — 2023

Актуальность темы исследования

При проектировании космических аппаратов (КА) важную роль играет корректный отбор электронных схем для бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА), используемых для стабильного функционирования подсистем КА, в том числе обеспечивающих его ориентацию и стабилизацию в пространстве, связь и др. К элементной базе космических аппаратов предъявляются строгие требования. Одним из ключевых моментов выступает устойчивость БРЭА КА к электромагнитным помехам, так как эти помехи, возникающие при электростатических разрядах (ЭСР), могут вывести аппарат из строя, либо существенно исказить работу подсистем спутника. ЭСР чаще возникают, когда происходят геомагнитные возмущения магнитосферы Земли.

В настоящее время активно развивается применение микроэлектромеханических систем (МЭМС), которые объединяют в себе как механические, так и электрические компоненты микронных размеров. Соответствующая технология используется для создания различных микросхем, в том числе применяемых в космическом приборостроении. Однако, хотя эта технология позволяет создавать печатные платы меньшего размера без ущерба для полезной нагрузки, возникает риск отказа электронной схемы из-за воздействия ЭСР, так как чувствительность элементной базы становится выше.

Отказы электронных систем опасны тем, что КА может быть потерян в космическом пространстве, что влечет за собой материальный ущерб для разработчиков. В соответствии со статистическими данными NASA 54% отказов КА на околоземных орбитах происходит по причине воздействия ЭСР на электронную базу КА. Таким образом перед учеными стоит актуальная проблема по защите БРЭА КА от поражающих факторов электризации, поэтому важно улучшать не только бортовую электронику, но и совершенствовать современный космический аппарат на этапе

проектирования для снижения влияния разрушительных факторов электризации на электронику КА.

Для КА, функционирующих на геостационарных орбитах (ГСО), высокоэллиптических орбитах (ВЭО), в авроральных зонах магнитосферы Земли, выявлено, что основной причиной возникновения ЭСР выступает дифференциальное заряджение элементов на внешней поверхности КА. Если рассмотреть частный случай, а именно КА на ГСО, то разность потенциалов на поверхности КА может достигать 20 кВ, что может привести к возникновению ЭСР с энергией 6-200 мДж. В результате возникают импульсные токи, протекающие по корпусу КА, до 100 А. Этот процесс влечет за собой появление электромагнитных помех (ЭМП) в кабелях БРЭА, что может привести к полному отказу КА, либо к необратимым искажениям в работе БРЭА.

Российские ученые Саенко В.С., Пожидаев Е.Д., Кечиев Л.Н., Кириллов В.Ю., Новиков Л.С., Ходненко В.П., Тютнев А.П. и др. успешно работают в области исследования электризации КА и защиты БРЭА КА от воздействия ЭСР, ими разработаны эффективные методы её испытаний и повышения помехозащищенности. Необходимо отметить также ряд зарубежных ученых, работающих в указанной области и среди них Г. Гаррета, А. Виттлеси, М. Боде, Р. Хьюза, С. Миноу, Д. Паркер, М. де Санта Круз и ряд др.

При проектировании КА для БРЭА нового поколения создаются сложные конструкции, что является причиной возникновения трудностей во время моделирования и проведения экспериментов для определения воздействия ЭСР на конструкции КА и БРЭА. Это вызывает сложности при разработке новых концепций проектирования как на этапе создания теоретических основ, так и на этапе создания методологии конструирования БРЭА КА, поэтому необходимо применять на практике новейшие разработки по предотвращению влияния ЭСР на КА. Перед учеными стоит задача обеспечить стойкость РЭА спутников к влиянию ЭСР, что позволит уменьшить возможный ущерб от потери КА, БРЭА, которая подвергается их

воздействию.

Таким образом, повышение качества проектирования БРЭА КА путем устранения электризации, вызванной воздействием космической плазмы, является актуальной научно-технической задачей, и ее решение будет актуальным и важным шагом в развитии различных областей экономики страны, а также внесет определенный вклад в обороноспособность страны.

Целью исследования является повышение срока активного существования КА путем увеличения устойчивости БРЭА к возникновению ЭСР за счет применения в ней композитных диэлектриков с повышенной проводимостью, исключаящей ЭСР при сохранении неизменными рабочих характеристик этой БРЭА.

В соответствии с целью работы были поставлены и решены следующие научные и прикладные **задачи**:

1. На основании тщательно проведенного аналитического обзора литературных источников по электризации выявлены физические факторы, определяющие возникновение ЭСР вследствие внутренней электризации КА. Показано, что в настоящее время нет достаточно эффективных методов, защиты от неё. Проведенный анализ позволил сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.
2. Предложена физико-математическая модель, описывающая кинетику радиационного заряжения композитных полимерных диэлектриков. Модель учитывает величину удельной объемной (темновой) проводимости полимерного композита в виде параметра, и возникающей при действии плазмы радиационной проводимости в виде зависимости от времени облучения и от плотности потока электронов плазмы. Модель дает возможность произвести расчёт изменения величины напряженности электрического поля в композитных полимерных диэлектриках в течение электронного облучения, а также определять условия, приводящие к возникновению электростатического

разряда.

3. Разработана методика моделирования для выявления и обоснования величин проводимости этих диэлектриков, обеспечивающей сток накапливаемого заряда и отсутствие электростатических разрядов. В основе методики лежит экспериментальное исследование зависимости радиационной проводимости (РП) от времени воздействия электронов плазмы, последующая обработка данных с получением аппроксимационной функции и преобразованием последней в рабочую функцию зависимости РП от времени облучения и от плотности потока электронов плазмы.
4. Для ряда модельных полимеров выполнены экспериментальные исследования радиационной проводимости, необходимые для проведения расчетов и выполнено моделирование радиационного заряжения композитных полимерных диэлектриков под действием космической плазмы в условиях спокойной геомагнитной обстановки и в условиях протекания суббури. На этой основе найдены величины удельной объемной проводимости этих материалов, обеспечивающей отсутствие ЭСР. Получено и обосновано значение удельной объемной проводимости, при которой даже в условиях геомагнитной суббури для всех полимеров будет обеспечен достаточный сток заряда для предотвращения ЭСР.
5. Разработаны Spice-модели радиоэлектронных устройств – гетеродина и широкополосного усилителя, отличительной особенностью которых является учет токовых утечек в печатных платах, использующих композитный полимерный диэлектрик с повышенной проводимостью.
6. С использованием разработанных моделей проведено компьютерное моделирование рабочих характеристик гетеродина и широкополосного усилителя с полимерным композитным материалом ПП, который обладает повышенной проводимостью. Выявлены пределы, в которых эти характеристики остаются неизменными. Экспериментальные

исследования макетов соответствующих устройств подтвердили результаты моделирования.

7. Создана инженерная методика выбора композитного полимерного диэлектрика в составе БРЭА КА, реализованной на печатных платах с композитным диэлектриком, обладающим повышенной проводимостью и обеспечивающим отсутствие ЭСР при сохранении неизменными рабочих характеристик соответствующих устройств.

Научная новизна результатов работы:

1. Предложена кинетическая модель радиационного заряжения композитных полимерных диэлектриков для случая, когда экстраполированный пробег электрона меньше его толщины. Модель отличается тем, что учитывает величину удельной объемной (темновой) проводимости полимерного композита в виде параметра, и возникающей при действии плазмы радиационной проводимости в виде зависимости от времени облучения и от плотности потока электронов плазмы. Модель позволяет рассчитать напряженность электрического поля в зависимости от времени облучения электронами композитных полимерных диэлектриков, и установить условия возникновения электростатического разряда.
2. Разработана соответствующая методика моделирования, в основе которой лежит экспериментальное исследование зависимости радиационной проводимости от времени воздействия электронов плазмы, последующая обработка данных с получением аппроксимационной функции экспериментальных данных с использованием методов параметрической идентификации, преобразованием последней в рабочую функцию зависимости РП от времени облучения и от плотности потока электронов плазмы. Методика обеспечивает проведение расчетов для плотности потока электронов, соответствующей спокойной геомагнитной

обстановке, и плотности потока, соответствующей протеканию суббури. При этом находится величина максимально достигаемой напряженности электрического поля, и она сопоставляется с критериальным значением электрического поля, соответствующем началу возникновения электростатических разрядов.

3. Для ряда полимерных диэлектриков с помощью компьютерного моделирования установлены величины удельной объемной РП, обеспечивающей сток накапливаемого заряда и отсутствие ЭСР. Получено и обосновано значение удельной объемной проводности, составляющее $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, при которой в условиях геомагнитной суббури для всех полимеров будет обеспечен достаточный сток заряда для предотвращения ЭСР.
4. Предложены Spice-модели радиоэлектронных устройств – гетеродина и широкополосного усилителя, у которых в печатной плате используется композитный полимерный диэлектрик, у которого проводимость выше по сравнению с обычно использующимися полимерами. Предложенные модели отличаются от традиционных тем, что в схему введены дополнительные сопротивления, характеризующие токовые утечки между узлами устройств и утечки на нулевой проводник, вызванные уменьшением удельного объемного сопротивления печатной платы.
5. Результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования рабочих характеристик указанных устройств, показавшие, что частота и амплитуда выходного напряжения гетеродина остаются неизменными, пока удельная объемная проводимость диэлектрика печатной платы не превышает $2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а полоса пропускания и коэффициент усиления широкополосного усилителя остаются неизменными, пока удельная объемная проводимость диэлектрика печатной платы не превышает $1.2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Практическая значимость работы:

1. На примере гетеродина и широкополосного усилителя показана эффективность использования композитных диэлектриков с повышенной проводимостью. Диэлектрики этого типа могут использоваться в радиоэлектронных устройствах, используемых в космической отрасли, чтобы предотвращать возникновение ЭСР и отказы в работе оборудования.
2. Разработана инженерная методика выбора композитного полимерного диэлектрика, исключающего возникновение ЭСР и обеспечивающего работоспособность радиоэлектронных устройств космического применения без изменения рабочих характеристик.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Кинетическая модель и методика моделирования радиационного заряжения композитных полимерных диэлектриков.
2. Результаты моделирования кинетики радиационного заряжения композитных полимерных диэлектриков, позволившие установить величины их суммарной проводимости, обеспечивающие отсутствие возникновения электростатических разрядов.
3. Модели радиоэлектронных устройств (гетеродин и широкополосный усилитель), отличительной особенностью которых является учет токовых утечек в печатных платах, использующих композитный полимерный диэлектрик с повышенной проводимостью.
4. Результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования рабочих характеристик указанных устройств.
5. Инженерная методика выбора композитного полимерного диэлектрика в составе БРЭА КА, обеспечивающего отсутствие ЭСР, и обеспечивающая работоспособность без изменения рабочих характеристик радиоэлектронных устройств космического применения.

Личный вклад соискателя состоит в принятии участия в постановке задач работы, нахождении решений, создании оригинального экспериментального метода определения величин фактора накопления дозы для полиэтилентерефталата при различных энергиях электронного излучения, создании моделей гетеродина и широкополосного усилителя, у которых диэлектрик печатной платы заменен на композитный диэлектрик с повышенной проводимостью. Автор лично разработал физическую модель и методику радиационного заряжения композитных полимерных диэлектриков. Методика позволяет произвести расчет изменения величины напряженности электрического поля в композитных полимерных диэлектриках на протяжении электронного облучения. Лично автором изготовлены экспериментальные макеты гетеродина и широкополосного усилителя и проведены исследования их рабочих характеристик. Лично автором и при участии автора подготовлены основные публикации по выполненной работе. В рамках диссертационного исследования Абрамешин Д.А. как автор получил Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618166 от 22 июля 2016 г. «Расчет поглощенной дозы электронного излучения с учетом фактора накопления» (Приложение 1).

Апробация работы

Следующие всероссийские и международные конференции дают представление о достаточной апробации результатов, изложенных в диссертации:

1. Международный московский IEEE-семинар «Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)» г. Москва, Россия, 2018 г., доклад: «Research of output characteristics of the heterodyne executed on the printed circuit board with the increased resistance to electrostatic discharges»

2. The 15th Spacecraft Charging Technology Conference, г. Кобе, Япония, 2018 г., доклад: «Computer Simulations and Experimental Investigation for Heterodyne Characteristics on PCB with the Increased Resistance to Electrostatic Discharges»

3. International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED) г. Прага, Чехия, 2021 г., доклад: «Calculation of The Absorbed Dose of Electron Radiation in Polymer Cases of Microelectronic Devices, Considering the Factor of Its Accumulation»

4. Международная конференция молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления» г. Иннополис, Россия, 2021 г. доклад: «Virtual space virtual satellite»

5. Международная конференция молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления» г. Иннополис, Россия, 2021 г. доклад: «Data transfer from satellite to ground station emulator»

6. Международный московский IEEE-семинар Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT-2022), г. Москва, Россия, 2022 г. доклад: «Engineering Methodology for the Selection of a Composite Polymer Dielectric that Ensures the Absence of Electrostatic Discharges in the Design of the Onboard Electronic Equipment of the Spacecraft»

7. Межвузовская научно-технической конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, г. Москва, Россия, 2016 г. доклад «Разработка подпрограммы расчета поглощенной дозы электронного излучения с учетом фактора ее накопления»;

8. Межвузовская научно-технической конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, г. Москва, Россия, 2020 г. доклад «Программа обработки экспериментальных результатов по радиационной проводимости полимерных пленок для моделирования процесса их заряжения»;

9. Межвузовская научно-технической конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, г. Москва, Россия, 2021 г. доклад «Радиационная электропроводность полистирола»;

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы.

В первой главе изложен обзор и критический анализ литературных данных по электризации околоземных высокоорбитальных КА. Анализируются основные причины возникновения ЭСР, обусловленные внутренней электризацией КА, рассмотрены основные методы защиты от внешней и внутренней электризации.

Во второй главе описана модель и методика моделирования радиационного заряжения ряда композитных полимерных диэлектриков, обладающих повышенной проводимостью, приведены результаты моделирования для условий спокойной геомагнитной обстановки и протекания суббури, и определены величины удельной объемной проводимости полимерных композитов, при которой не будут возникать ЭСР. Это позволило установить критериальное значение удельной объемной проводимости, при которой для всех полимерных композитов будет обеспечен достаточный сток заряда для предотвращения ЭСР.

В третьей главе изложены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования рабочих характеристик стандартных аналоговых радиоэлектронных устройств – гетеродина и широкополосного усилителя с целью выявления границ возможного использования композитного диэлектрика с повышенной проводимостью. Показано, что увеличение удельной объемной проводимости диэлектрика ПП до определенных значений, зависящих от вида радиоэлектронных средств, практически не изменяет основных рабочих характеристик этих устройств.

В четвертой главе излагается разработанная инженерная методика выбора композитного полимерного диэлектрика с повышенной

проводимостью, обеспечивающего отсутствие ЭСР, для радиоэлектронных средств в составе БРЭА КА. Методика предназначена для разрабатываемых радиоэлектронных средств космического применения, работающих на борту КА, эксплуатируемых в условиях интенсивного воздействия космической плазмы.

В заключении диссертации изложены итоги выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

Список опубликованных статей, отражающих основные результаты диссертации

Основные положения диссертации представлены в работах, опубликованных автором в ведущих рецензируемых научных журналах, в том числе в изданиях, индексируемых в Scopus и Wos:

1. «Abrameshin D., Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Tumkovskiy S. Calculation of The Absorbed Dose of Electron Radiation in Polymer Cases of Microelectronic Devices, Considering the Factor of Its Accumulation, in: 2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). IEEE, 2021»
2. «Tyutnev A. P., Saenko V. S., Aleksey D. Zhadov, Dmitriy A. Abrameshin. Theoretical Analysis of the Radiation-Induced Conductivity in Polymers Exposed to Pulsed and Continuous Electron Beams // Polymers. 2020. Vol. 12. No. 628. P. 1-10.»
3. «Abrameshin D.A., Pozhidaev E.D., Saenko V.S., Tumkovskiy S.R. Computer Simulations and Experimental Investigation of the Heterodyne Employing Printed Circuit Board With an Increased Resistance to Electrostatic Discharges // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019.»
4. «Abrameshin D., Tumkovskiy S., Pozhidaev E. Research of output characteristics of the heterodyne executed on the printed circuit board with the increased resistance to electrostatic discharges, in: 2018 Moscow

Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT): IEEE, 2018.»

5. «Abrameshin D., Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V., Petrov M., Ganchevskaya S., Tkachenko I., Yuzifovich Y., Nikonorov A., Skidanov R., Kazanskiy N., Soifer V. First Earth-Imaging CubeSat with Harmonic Diffractive Lens. Electronics (MDPI), 2022»

Публикации соискателя в других изданиях:

1. «Абрамешин Д. А., Пожидаев Е. Д., Тумковский С. Р. Моделирование радиационного заряжения корпусов микроэлектронной аппаратуры космического применения. Информационные технологии. 2021. Т. 27. № 2. С. 59-64.»
2. «Абрамешин Д. А., Звездов Д. С. Утилиты в по Mathcad для уточненного расчета электрических полей при облучении полимерных пленок электронами низких энергий // Системный администратор. 2016.»

Приложение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2016618166

Расчет поглощенной дозы электронного излучения с учетом фактора ее накопления

Правообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (RU)*

Автор: *Абрамшин Дмитрий Андреевич (RU)*



Заявка № **2016615735**
Дата поступления **02 июня 2016 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **22 июля 2016 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*