

## ИСКЛЮЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОПРОВОДЯЩИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

АБРАМЕШИН А.Е., БЕЛИК Г.А., САЕНКО В.С.

Московский Государственный институт электроники и математики (технический университет) НИУ ВШЭ

(109028, Москва, Б.Трехсвятительский пер., д. 3/12)

(E-mail: [fit@miem.edu.ru](mailto:fit@miem.edu.ru))

Внутренняя электризация часто является причиной выхода из строя бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (КА). Данная проблема наиболее актуальна для спутников, работающих на геостационарной орбите или на высокоэллиптических орбитах. КА на этих орбитах наиболее подвержены воздействию электронов с энергией превышающей 1 МэВ, которые и определяют внутреннюю электризацию. Традиционно используемые в бортовой радиоэлектронной аппаратуре (БРЭА) диэлектрики являются потенциальными накопителями объемных зарядов. Когда электрические поля, создаваемые высокоэнергетическими электронами, достигают критических значений, происходят электростатические разряды (ЭСР), которые и вызывают отказы БРЭА. Для устранения этого негативного явления необходимо применять нанопроводящие диэлектрики, которые исключают возможность накопления зарядов с последующим возникновением разрядов.

Поражающие факторы внутренней электризации можно классифицировать по способу поражения, как самих электронных блоков БРЭА, элементов электронных схем, так и элементов коммуникаций:

- разряды непосредственно в токопроводящие жилы кабелей, соединяющие между собой электронные блоки, антенны, датчики и панели солнечных батарей;

- разряды в проводники печатных плат блоков электроники. Эти разряды создают мощные электрические импульсы, которые поступают на выводы компонентов электронных схем (ИМС, транзисторы, диоды и др.);

- разряды непосредственно в кристаллы полупроводниковых элементов (транзисторов, диодов, ИМС и прочих) из диэлектрических корпусов этих элементов.

Для нормального функционирования КА представляют опасность все три перечисленных способа поражения БРЭА.

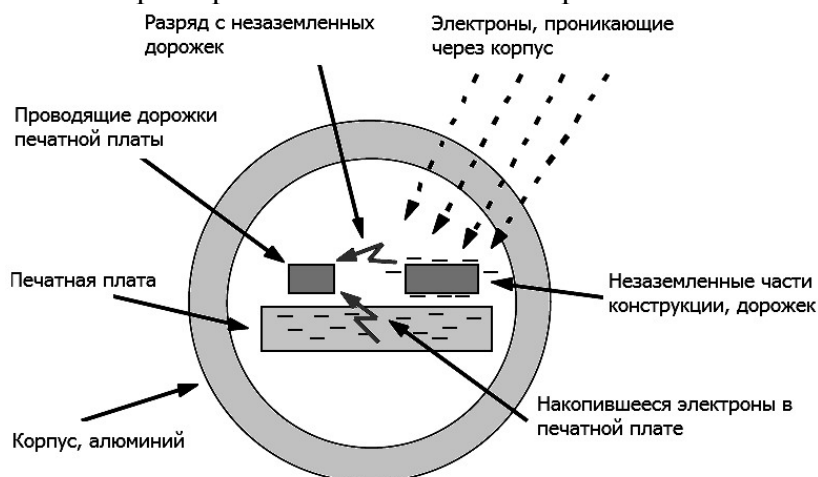


Рис. 1 Основные механизмы внутренней электризации [1,2]

Вообще говоря, явление электризации диэлектрических материалов внутри корпусов бортовой аппаратуры было известно давно, но с широким появлением спутниковых платформ «открытого» типа, этот вопрос стал как никогда актуален, что и показали многочисленные отказы КА. К сожалению, меры защиты от этого поражающего фактора электризации очень ограничены. Действительно, нельзя же каждый активный элемент электронной схемы обезопасить множеством фильтров, массогабаритные показатели которых значительно превышают эти показатели для самого активного элемента. Остается путь исключения возможности возникновения таких разрядов. Но для этого необходима разработка новых диэлектрических материалов, из которых будут изготавливаться печатные платы для электронных блоков КА нового поколения. Эти материалы должны обладать особыми свойствами. С одной стороны, материал печатной платы должен оставаться диэлектриком, не допускающим значительных паразитных токов утечки, а с другой стороны, электропроводность этого материала должна быть достаточной для быстрой релаксации объемных зарядов и исключения пробойных явлений [3].

Фундаментальное значение в преодолении негативных факторов электризации имеют исследования, посвященные 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) [4]. Между внутренним и внешним ЕРПЗ наблюдается пауза 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 (ВРПЗ) с плотностью потока электронов ( $E > 40$  кэВ) порядка  $10^{-9}$  А/см<sup>2</sup> во время геомагнитных возмущений на высоте около 16500 км. [5]

Широко применяются полуэмпирические модели потоков электронов, разработанные NASA (AE8 min, AE8 max) и НИИЯФ МГУ. На основании них созданы различные программные пакеты, такие как SPENVIS (ЕКА), COSRAD (НИИЯФ МГУ), RADMODLS (NASA) и др., подробное применение которых для расчета потоков электронов за определенной массовой защитой в эквиваленте алюминия на нескольких вариантах орбит описано в работах [6,7].

Таким образом, воздействие внешней космической среды на функционирование КА связано с активностью радиационных поясов, излучений генерируемых солнцем и космического излучения. 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 выявления количественных характеристик, например, потока электронов, так и выяснения механизмов возникновения и регулирования излучений разного рода в околоземном пространстве.

В последние годы именно феномен внутренней электризации становится всё более востребованным предметом исследований, как в нашей стране, так и за рубежом. Именно внутренняя электризация признана причиной потери многочисленных спутников связи США. В ответ на это, почти одновременно в 1999 г., были выпущены руководства для конструкторов космической техники, посвященные проблеме внутренней электризации: руководство НАСА NASA HDBK 4002 [1] (с изменениями – в 2011 году, NASA HDBK 4002A [2]).

В упомянутом справочнике НАСА на основании данных натурных измерений считается, что при плотности нормально падающего электронного потока внутрь прибора не выше  $10^{-13}$  А/см<sup>2</sup> (примерно соответствует  $2 \cdot 10^{10}$  эл/см<sup>2</sup> за 10 часов), внутренняя электризация КА не является проблемой. Также приводится безо-

пасное значение толщины эквивалентной защиты в единицах алюминия – 110 мил (2,79 мм). Однако, существуют и оценки меньшие по флюенсу, но большие по длительности [8], они состоят в утверждении безопасных границ эксплуатации электронного оборудования на КА (истинный порог отказа аппаратуры). Это напряжённость поля в районе 100-200 кВ/см или плотность электризации 6-20 нКл/см<sup>2</sup>. 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)

Ещё одним фундаментальным направлением в изучении электризации КА с целью устранения 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 КА от поражающих факторов их электризации – концепция «нанопроводимости диэлектриков» взамен предыдущей предыдущей концепции «клетки Фарадея», которая с успехом использовалась для защиты от поражающих факторов электризации БРЭА КА предыдущего поколения, однако оказалась непригодной для нового поколения изделий главным образом из-за внутренней электризации. В основу предложенной концепции положено требование, исключающее применение при создании новых КА диэлектрических материалов с удельной проводимостью ниже значения  $10^{-10}$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>. Это требование обеспечивает сток зарядов из объема диэлектриков без электростатических разрядов и таким образом создает адекватную защиту КА. [3]

Эти материалы должны обладать оптимальной величиной темновой электропроводности. Это означает, что с одной стороны материал печатной платы должен оставаться диэлектриком, не допускающим значительных паразитных токов утечки, а с другой стороны, электропроводность этого материала должна быть достаточной для быстрой релаксации объёмных зарядов и исключения пробойных явлений. Был проведен ряд экспериментальных работ, по получению сведений об электризуемости такого диэлектрика. Для простоты проведения экспериментальных исследований был выбран парафин. В парафин добавлялись проводящие частицы технического углерода (сажи), размером 10-100 нм. Образец для исследований электрофизических характеристик представлял собой плоский конденсатор с охранным кольцом. Диаметр верхней обкладки конденсатора – 60 мм, толщина образца 1,5-2 мм. Все измерения проводились на частоте 1МГц при температуре плюс 25 С.

Такая конфигурация образцов позволила последовательно проводить измерения как удельного сопротивления образца на постоянном токе, так и измерения его диэлектрической проницаемости на частоте 1 МГц.

Кроме того, были выполнены эксперименты по исследованию электризуемости приготовленных образцов при воздействии низкоэнергетического электронного излучения. Образцы помещались в вакуумную камеру электронно-лучевой установки ЭЛА-50/5, где подвергались облучению электронами с энергией (20...50) кэВ с плотностью тока  $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>.

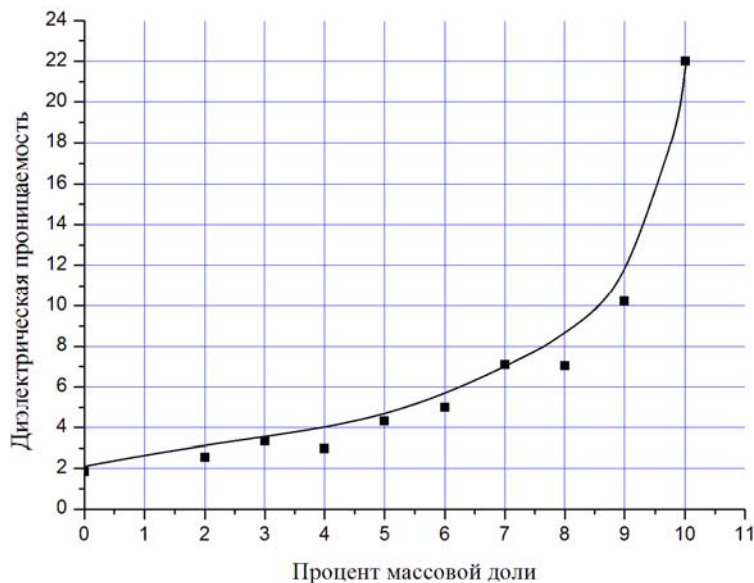


Рис.2. Зависимость диэлектрической проницаемости от концентрации добавленной сажи в образец.

Измерения удельного объемного сопротивления образца проводилось косвенным методом путем измерения тока через образец при помощи электрометра ВК2-16.

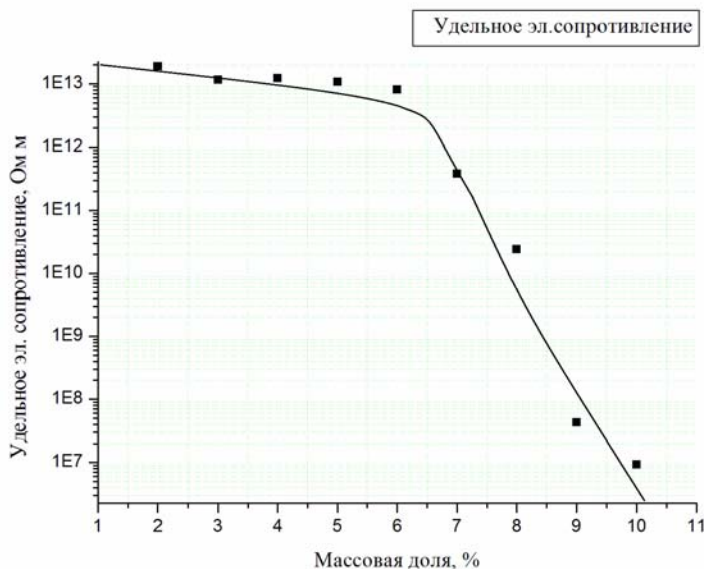


Рис. 3. Зависимость удельного электрического сопротивления парафина от концентрации добавленной сажи в образец. Горизонтальная линия является границей. Для удельного сопротивления образцов выше этой линии наблюдались ЭСР.

В результате проведенных экспериментов установлено, что требуемые свойства диэлектрика по отсутствию электризуемости обеспечиваются введением проводящих частиц сажи. Из такого диэлектрика была изготовлена макетная печатная плата мульти-вибратора на частоту 60 МГц. Было установлено, что повышенная проводимость не ухудшает характеристик этого импульсного устройства.

Итак, предложенный подход в устранении объёмного заряжения диэлектриков, из которых состоит элементная база бортовой электронной аппаратуры, открывает новые пути создания материалов БРЭА КА, стойких к внутренней электризации. Данный путь совершенствования оборудования космических аппаратов в перспективе должен повысить их надежность и увеличить срок активного существования.

#### Литература

1. Avoiding Problems Caused by Spacecraft On-Orbit Internal Charging Effects / NASA – HDBK – 4002, Febr 17 1999.
2. Mitigating In-Space Charging Effects-A Guideline / NASA – HDBK – 4002A, Apr 3, 2011
3. Пожидаев Е.Д., Саенко В.С. Смирнов И.А., Бабкин Г.В., Морозов Е.П., Тютнев А.О., Флоридов А.А., Доронин А.Н. Повышение стойкости космических аппаратов к воздействию пора-

жающих факторов электризации // Космонавтика и ракетостроение, 2003 №1, с. 32-35.

4. Безродных И.П., Казанцев С.Г., Семёнов В.Т. Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. Т.116,с.23-26.

5. 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.

6. 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.

7. 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

8. Bodeau M. High Energy Electron Climatology that Supports Deep Charging Risk Assessment in GEO // AIAA 2010-1608 48<sup>th</sup> AIAA Aerospace Science Meeting.