

УДК 629.78:539.12.04 EDN HRMSGV

## **Электростатические разряды при электризации печатных плат в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов**

**В. Ф. Зинченко**, д. ф.-м. н., [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. С. Семочкин**, [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**И. Е. Сидоренко**, к. т. н., [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Проведены расчетные исследования условий возникновения пробоя печатных плат в приборах бортовой аппаратуры вследствие накопления заряда в стеклотекстолите FR-4 при действии электронного излучения космического пространства на орбите космического аппарата ГЛОНАСС. Показано, что при мощных солнечных вспышках электростатические разряды, возникающие вследствие объемной ионизации стеклотекстолита, могут приводить к пробоям печатных плат в приборах бортовой аппаратуры при суммарной толщине защиты, не превышающей 3 мм алюминия.

Отмечается, что объемная электризация диэлектрика печатных плат в приборах бортовой аппаратуры при суммарной толщине защиты более 3 мм алюминия не может привести к генерации электростатических разрядов, приводящих к сбоям и отказам в функционировании бортовой аппаратуры в реальных условиях космического пространства. Электростатические разряды, способные вызвать указанные эффекты, могут быть обусловлены, например, генерацией импульсных электромагнитных наводок вследствие электризации диэлектрических материалов в кабелях бортовой кабельной сети.

**Ключевые слова:** печатные платы, объемная электризация, электростатические разряды, пробой, электроны, космическое пространство

**Для цитирования:** Зинченко В. Ф., Семочкин А. С., Сидоренко И. Е. Электростатические разряды при электризации печатных плат в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2024. Т. 11. № 3. С. 85–90.

## Electrostatic Discharges at Electrification of Printed Circuit Boards as a Part of Onboard Spacecraft Equipment

**V. F. Zinchenko**, *Dr. Sci. (Phys.–Math.), contact@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**A. S. Semochkin**, *contact@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**I. E. Sidorenko**, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** Calculated studies of breakdown conditions of printed circuit boards in onboard equipment devices due to charge accumulation in FR-4 fiberglass plastic under the action of electron radiation of outer space in the orbit of GLONASS spacecraft are carried out. It is shown that at powerful solar flares electrostatic discharges arising due to bulk ionization of fiberglass plastic can lead to breakdowns of printed circuit boards in onboard equipment devices at total thickness of protection not exceeding 3 mm of aluminium. It is noted that volumetric electrification of dielectric of printed circuit boards in onboard equipment devices at total thickness of protection more than 3 mm of aluminium cannot lead to generation of electrostatic discharges leading to failures and malfunctions in functioning of onboard equipment in real space conditions. Electrostatic discharges capable of causing the above effects can be caused, for example, by generation of pulse electromagnetic interference due to charging of dielectric materials in the cables of the onboard cable network.

**Keywords:** printed circuit boards, bulk charging, electrostatic discharges, breakdown, electrons, outer space

**For citation:** Zinchenko V.F., Semochkin A.S., Sidorenko I.E. Electrostatic Discharges at Electrification of Printed Circuit Boards as a Part of Onboard Spacecraft Equipment. *Rocket-Space Device Engineering and Information systems*. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 85–90.

Электризация космических аппаратов (КА) как внешняя, так и внутренняя, является одним из основных поражающих факторов, действующих на бортовую аппаратуру (БА) КА в условиях космического пространства (КП). В результате электризации возникают электростатические разряды (ЭСР), которые можно разделить на следующие основные группы по способу поражения как самих электронных блоков, так и элементов микроэлектроники в их составе ([1]):

- разряды на поверхности КА, создающие импульсные помехи в бортовой кабельной сети, антеннах и датчиках, расположенных на внешней поверхности КА;
- разряды непосредственно в кабели, соединяющие между собой электронные блоки, антенны, датчики и панели солнечных батарей;
- разряды в печатные проводники блоков электроники (выводы интегральных микросхем, транзисторов, диодов и т. п.);
- разряды непосредственно в кристаллы полупроводниковых изделий микроэлектроники из их диэлектрических корпусов.

Вопросы защиты БА КА от ЭСР, несмотря на множество исследований, выполненных по данной тематике как в России, так и за рубежом, остаются актуальными и в настоящее время. Это обусловлено тем фактом, что, как показывает статистика, более половины регистрируемых сбоев и отказов в функционировании БА являются результатом действия ЭСР (рис. 1).

В данной работе проведен анализ возможности реализации частного случая поражающего действия ЭСР — возникновения пробоя в приборах БА в результате процессов прямой электризации печатных плат. Основные механизмы ЭСР в печатных платах при внутренней электризации КА представлены на рис. 2.

Основную роль в процессах внутренней электризации КА играют высокоэнергетичные электроны с энергиями выше 2 МэВ, способные проникать через корпуса приборов БА и создавать значительный объемный заряд при поглощении в конструктивных диэлектрических материалах. Это может вызывать ЭСР, приводящие к сбоям и даже отказам в функционировании БА.

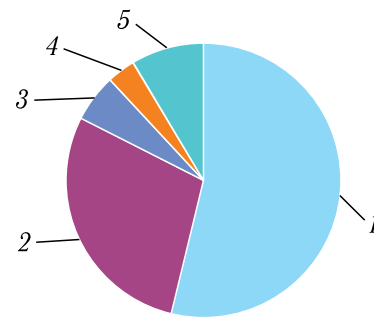


Рис. 1. Отказы КА на геостационарной орбите, вызванные различными факторами КП: 1 — ЭСР; 2 — эффекты одиночных событий; 3 — дозовые эффекты; 4 — микрометеориты; 5 — остальные ([2])

Fig. 1. Spacecraft failures in the geostationary orbit caused by different space factors: 1 — electrostatic discharges; 2 — single event effects; 3 — dose effects; 4 — micrometeorites; 5 — others ([2])

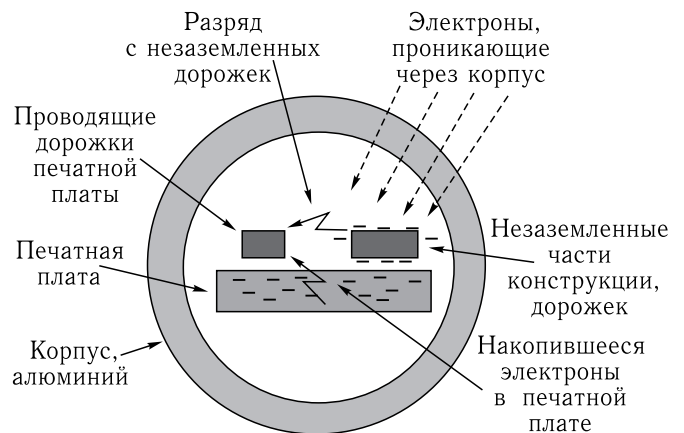


Рис. 2. Основные механизмы ЭСР при внутренней электризации печатных плат в приборах БА ([3])

Fig. 2. Main mechanisms of electrostatic discharges at internal electrification of printed circuit boards in on-board devices ([3])

Потоки быстрых электронов значительно возрастают в период геомагнитных бурь, вызываемых солнечными вспышками. Это обусловлено тем, что в период геомагнитной бури усиленный поток высокоэнергетичных электронов пересекает границу магнитопаузы и диффундирует внутрь радиационных поясов Земли. Уровень плотности потока электронов с энергиями выше 2 МэВ, равный  $10^3$  эл/см<sup>2</sup>·с-ср, согласно рекомендациям Центра прогнозирования космической погоды (Space Weather Prediction Center) США, принят в качестве

пороговой величины относительно возникновения эффектов, обусловленных ЭСР, в БА КА ([4]).

На рис. 3 представлен поперечный разрез типичной печатной платы из фольгированного стеклотекстолита FR-4, применяемой в приборах БА.

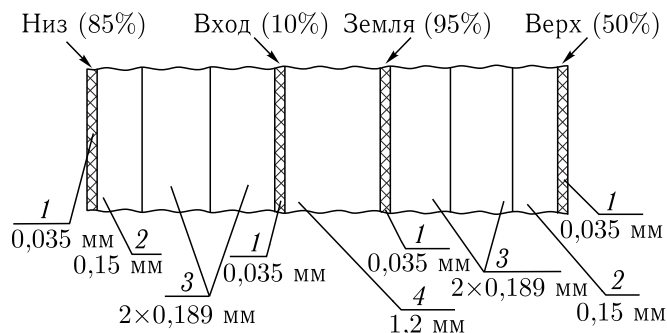


Рис. 3. Поперечный разрез типичной печатной платы: 1 — токопроводящие дорожки, проценты указывают содержание меди; 2, 4 — стеклотекстолит FR-4; 3 — прокладки, стекловолокно

Fig. 3. Cross section of a typical printed circuit board: 1 — conductive tracks, percent indicates a copper content; 2, 4 — FR-4 fiberglass plastic; 3 — gaskets, glass fibre

Очевидно, что максимальный заряд электронов в представленной на рис. 3 структуре печатной платы, способный вызвать ЭСР, будет накапливаться в слое диэлектрика FR-4 толщиной 1,2 мм. При этом возникновение ЭСР в данной печатной плате наиболее вероятно на границе раздела указанного слоя и токопроводящей дорожки при напряженности электрического поля, сравнимой с пороговой напряженностью пробоя для диэлектрика FR-4 (около 40 кВ/мм).

Для упрощения задачи нахождения распределения электрического поля в слое диэлектрика FR-4 заданной толщины  $a = 1,2$  мм (массовой толщины около  $0,22$  г/см<sup>2</sup> при плотности  $\approx 1,85$  г/см<sup>3</sup>) будем рассматривать одномерную геометрию. Тогда распределение потенциала электрического поля внутри слоя диэлектрика можно получить из решения уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (1)$$

где  $\rho(x)$  — распределение плотности заряда электронов, поглощенных в слое диэлектрика;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость,

для стеклотекстолита FR-4 равна  $\approx 5,5$ ;  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума в системе СИ.

Очевидно,

$$\rho(x) = -eN_e(x), \quad (2)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кул — электрический заряд электрона,  $N_e(x)$  — распределение плотности поглощенных электронов в слое диэлектрика.

Распределение плотности поглощенных электронов  $N_e(x)$  было получено в результате моделирования с помощью метода Монте-Карло переноса падающих электронов КП в одномерном гетерогенном барьере, с учетом поглощения электронов в корпусе прибора. В качестве исходных данных использовался прогнозируемый в максимуме солнечной активности, усредненный за год дифференциальный энергетический спектр электронов КП на орбите КА ГЛОНАСС, полученный в результате обработки информации, представленной в работе [5] (см. табл. 1).

Таблица 1. Дифференциальный энергетический спектр плотности потока электронов КП

Энергия, МэВ	Плотность потока, $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ} \cdot \text{ср})$
0,1	$1,4 \cdot 10^7$
0,3	$2,4 \cdot 10^6$
0,5	$8,0 \cdot 10^5$
0,7	$4,8 \cdot 10^5$
1,0	$1,4 \cdot 10^5$
1,5	$5,6 \cdot 10^4$
2,0	$2,0 \cdot 10^4$
2,5	$1,4 \cdot 10^4$
3,0	$5,6 \cdot 10^3$
4,0	$8,0 \cdot 10^2$
5,0	$6,4 \cdot 10^1$
6,0	$1,6 \cdot 10^0$
7,0	$8,0 \cdot 10^{-2}$

При расчете распределения  $N_e(x)$  в слое диэлектрика FR-4 учитывали ослабление падающих электронов КП корпусом прибора и другими конструктивными элементами КА. На рис. 4 для примера представлено распределение поглощенных электронов  $N_e(x)$  в гетерогенном барьере Al-FR-4-Al, полученное при суммарной толщине защиты перед печатной платой, эквивалентной

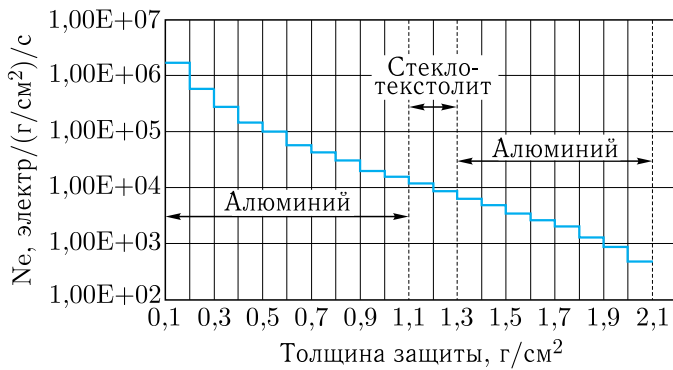


Рис. 4. Распределение плотности поглощенных электронов КП в гетерогенном барьере Al-FR-4-Al при суммарной толщине защиты, эквивалентной 4 мм алюминия

Fig. 4. Density distribution of the absorbed electron in space in the heterogeneous Al-FR-4-Al barrier at the total protection thickness equivalent to 4 mm aluminium

4 мм алюминия. За платой стеклотекстолита конструктивные материалы БА также представляли в виде слоя алюминия, в котором траектории электронов моделировались до их полного торможения.

Используя полученную информацию, можно выполнить приближенные оценки характеристик электростатического поля в диэлектрике FR-4 (напряженности и потенциала на границе раздела диэлектрик-токопроводящие дорожки) для одномерной геометрии печатной платы, представленной на рис. 2. Считая, что плотность поглощенного заряда электронов внутри тонкого слоя диэлектрика постоянна и равна средней величине, т.е.

$$\rho(x) = \bar{\rho}, \quad 0 \leq x \leq a,$$

можно получить выражение для распределения потенциала внутри слоя диэлектрика:

$$\varphi_i = -\frac{\bar{\rho}x^2}{2\epsilon\epsilon_0} + Ax + B. \quad (3)$$

Полагаем, что вне диэлектрика плотность заряда  $\rho = 0$ , поэтому выражение для потенциала имеет вид

$$\varphi_e = Cx + D. \quad (4)$$

Постоянные интегрирования  $A, B, C, D$  находятся из условия непрерывности  $\varphi, \frac{\partial\varphi}{\partial x}$  на границах печатной платы и токопроводящих дорожек при  $x = 0$  и  $x = a$ . При условии, что обкладка при  $x = 0$  заземлена, т.е. ее потенциал равен нулю,

получаем следующие выражения для потенциала и напряженности электрического поля в печатной плате:

$$\varphi_i = -\frac{\bar{\rho}x^2}{2\epsilon\epsilon_0} + \frac{\bar{\rho}ax}{2\epsilon\epsilon_0}, \quad E = \frac{\bar{\rho}x}{\epsilon\epsilon_0} - \frac{\bar{\rho}a}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (5)$$

Напряженность электрического поля на границе печатной платы и токопроводящих дорожек, с учетом дополнительного потенциала токопроводящей дорожки  $\varphi_0$  за счет внешнего источника питания, имеет вид

$$E_{ГР} = \frac{\bar{\rho}a}{2\epsilon\epsilon_0} + \frac{\varphi_0}{a}. \quad (6)$$

Оценим для примера величину  $E_{ГР}$  при суммарной толщине защиты 4 мм алюминия с учетом полученного распределения  $N_e(x)$ , представленного на рис. 4.

В качестве средней плотности поглощенных электронов в печатной плате,  $N_e$ , принимаем величину  $1,0 \cdot 10^4$  электр/(г/см<sup>2</sup>)/с в диапазоне толщин барьера от 1,1 до 1,3 г/см<sup>2</sup> (см. рис. 4). Проведенные, согласно выражению (6), оценки показывают, что при действии электронов КП в течение суток величина  $E_{ГР}$  составляет  $\approx 1,0 \cdot 10^{-2}$  кВ/мм, где вклад поглощенного заряда электронов КП в диэлектрике FR-4 составляет  $5,0 \cdot 10^{-3}$  кВ/мм, а вклад от внешнего потенциала  $\varphi_0$  с характерной величиной 5 В составляет  $\approx 5,0 \cdot 10^{-3}$  кВ/мм.

Результаты расчета  $E_{ГР}$  в зависимости от суммарной толщины защиты перед слоем диэлектрика FR-4 печатной платы представлены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, величина напряженности электрического поля  $E_{ГР}$  для толщин защиты, начиная с 2 мм алюминия, более чем на два порядка ниже пороговой напряженности пробоя 40 кВ/мм для диэлектрика FR-4. Однако здесь необходимо отметить следующее.

Таблица 2. Напряженность электрического поля  $E_{ГР}$  в диэлектрике FR-4 при различной толщине защиты

Толщина защиты, мм алюминия	$E_{ГР}$ , кВ/мм *)
2,0	$4,5 \cdot 10^{-2}$
2,5	$2,3 \cdot 10^{-2}$
3,0	$1,8 \cdot 10^{-2}$
4,0	$1,0 \cdot 10^{-2}$
5,0	$7,0 \cdot 10^{-3}$

Примечание. \*) с учетом вклада от внешнего потенциала  $\varphi_0$   $5,0 \cdot 10^{-3}$  кВ/мм.

Во-первых, представленные в табл. 2 величины  $E_{гр}$  были получены для усредненной за год плотности потока электронов, которая может быть в сотни раз ниже плотности потока электронов во время максимальных солнечных вспышек [5].

Во-вторых, как показывают теоретические исследования [6], локализация области электрического пробоя на границе металл–диэлектрик может быть связана с наличием на поверхности металлизации микроскопических неоднородностей (филаментов), в которых может происходить усиление напряженности электрического поля в несколько раз по сравнению со средним значением.

Из сказанного выше следует, что при максимальных солнечных вспышках ЭСР, обусловленные объемной электризацией печатных плат в приборах БА, могут приводить к их пробоям при суммарной толщине защиты, не превышающей 3 мм алюминия.

Необходимо отметить, что при суммарной толщине защиты не выше 3 мм алюминия корректный расчет плотности поглощенного заряда электронов в объеме БА можно выполнить только при использовании реального спектра электронов КП. Выбор энергии электронов 2 МэВ в качестве пороговой целесообразен при проведении расчетов внутренней электризации КА, если эквивалентная толщина защиты превышает 3 мм алюминия. Как видно из рис. 5, электроны с энергией 2 МэВ практически полностью поглощаются в барьере из алюминия толщиной 4 мм.

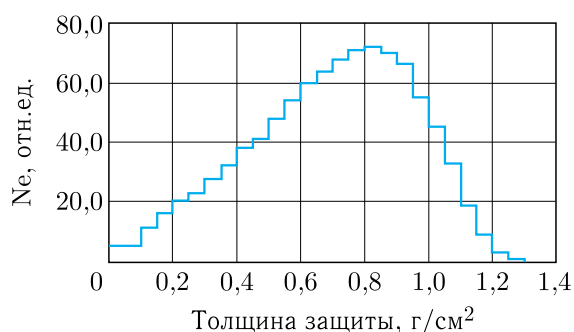


Рис. 5. Распределение плотности поглощенных электронов с энергией 2 МэВ в одномерном барьере из алюминия

Fig. 5. Density distribution of the absorbed electrons with the energy 2 MeV in a one-dimensional aluminium barrier

Таким образом, в заключение можно сделать следующие выводы.

Проведены оценки возможности пробоя печатных плат в приборах БА вследствие накопления заряда в диэлектрике FR-4 при действии электронного излучения КП на орбите КА ГЛОНАСС. Показано, что при максимальных солнечных вспышках ЭСР, возникающие вследствие объемной ионизации диэлектрика, могут приводить к пробоям печатных плат в приборах БА при суммарной толщине защиты, не превышающей 3 мм алюминия.

Объемная электризация печатных плат в приборах БА при суммарной толщине защиты выше 3 мм алюминия не может привести к генерации ЭСР, приводящих к сбоям и отказам в функционировании БА в реальных условиях КП. ЭСР, способные вызвать указанные эффекты, могут быть обусловлены, например, генерацией импульсных электромагнитных наводок вследствие электризации диэлектрических материалов в кабелях бортовой кабельной сети.

## Список литературы

1. Тютнев А.П., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д., Костюков Н.С. Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений. М.: Наука. 2005.
2. Fennel J.F. et al. Spacecraft charging: Observations and relationship to satellite anomalies // Spacecraft Charging Technology, Proceedings of 7-th International Conference, 23–27 April, 2001.
3. Mitigating in-Space Charging Effects — A Guideline NASA-HDBK-4002A
4. <http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-electron-flux>
5. Шилов А.Е., Волков С.Н., Безродных И.П., Семенов И.Т. Радиационные условия для высокоорбитальных космических аппаратов в период максимальной солнечной активности // Вопросы электромеханики. 2010. Т. 115. С. 47–52
6. Readley B.K. Mechanism of electrical breakdown in SiO<sub>2</sub> films // Journal of Applied Physics. 1975. V. 46. N. 3. P. 998–1007.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.05.2024  
Дата принятия рукописи  
в печать 26.08.2024