

УДК 621.396, 621.8.019.8

**А.Е. Абрамешин, В.В. Жаднов**

## **Моделирование интенсивности отказов интегральных схем бортовой космической аппаратуры из-за воздействия электростатических разрядов**

*Показатели безотказности бортовой космической аппаратуры в значительной степени зависят от характеристик надежности интегральных схем. Одной из возможных причин отказов интегральных схем является воздействие катастрофических электрических перегрузок вследствие электростатических разрядов. В статье рассматривается метод формирования математической модели интенсивности отказов интегральных схем и возможность его применения для интегральных схем аппаратуры космических аппаратов, эксплуатируемых на геостационарных или высокоэллиптических орбитах.*

**Ключевые слова:** электростатический разряд, интегральная схема, интенсивность отказов

### **Введение**

В моделях интенсивностей отказов интегральных схем (ИС), приведенных в отечественных справочниках [1, 2] нет коэффициентов, учитывающих влияние стойкости ИС (порогового напряжения –  $V_{TH}$ ) к воздействию электрических перегрузок (максимальному напряжению электростатических разрядов –  $V_{SS}$ ), т.е. предполагается, что если при разработке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) выполнено условие:

$$V_{TH} > V_{SS},$$

то вероятность отказа ИС из-за воздействия электростатических разрядов (ЭСР) пренебрежимо мала [5]. Однако у ИС аппаратуры космических аппаратов (КА), эксплуатируемых на геостационарных или высокоэллиптических орбитах, наблюдается значительное число отказов из-за воздействия ЭСР.

Отказы из-за катастрофических электрических перегрузок ИС представляют собой события, не связанные с внутренними механизмами отказов, т.к. они являются результатом воздействия приложенного внешнего напряжения (или тока). Развитие отказов, связанных с воздействием электрических перегрузок или ЭСР, не зависит от степени интеграции и определяется реальным уровнем стойкости конкретной микросхемы (за счет соответствующих схемотехнических и технологических решений) и условиями ее применения (характеристиками окружающей электрической среды), зависящими только от изготовителя РЭА.

### **Метод формирования модели интенсивности отказов**

Рассмотрим основные этапы формирования математической модели интенсивности отказов ( $\lambda_{EOS}$ ), приведенные в RADS-TR-89-177 [6].

Поскольку отказы из-за катастрофических электрических перегрузок не связаны с внутренними механизмами отказов ИС, то они не зависят от времени, а зависят только от вероятности возникновения чрезмерного напряжения ( $v_{SS}$ ) в окружающей электрической среде и чувствительности ИС к его воздействию. Поэтому вероятность возникновения электрических перегрузок может быть представлена как постоянная величина в функции распределения чувствительности ИС к воздействию  $v_{SS}$ .

Хотя существует много видов моделирования воздействия разрядов на ИС и определения реальных порогов их устойчивости, каждый со своими собственными характеристиками, такие как модель тела человека (Human Body Model), машинная модель (Machine Model), модель с заряженным

прибором (Charged Device Model) и др., наилучшим источником информации о чувствительности ИС (и в большинстве случаев единственным источником) являются испытания, предусмотренные в MIL-STD-883, метод 3015 – Human Body Model [7].

Схема проверки ИС на стойкость к ЭСР по методу 3015.7 приведена на рис. 1.

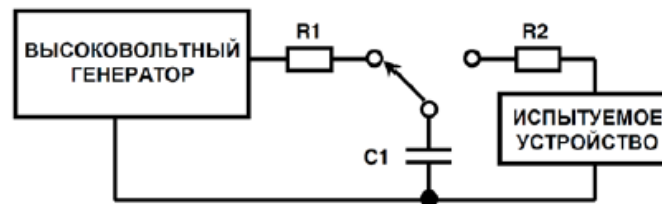


Рис. 1. Схема проверки ИС на стойкость к воздействию ЭСР

Типовые параметры схемы модели тела человека:  $V_{SS} = 2000$  В;  $C_1 = 100$  пФ (емкость тела человека);  $R_2 = 1500$  Ом (сопротивление кожи человека).

При этих параметрах длительность экспоненциально затухающего участка импульса тока равна:

$$\tau = R_2 \cdot C_1 = 150 \text{ нс.}$$

Время нарастания входного импульса тока ЭСР  $t_{RL}$  должно быть меньше, чем 10 нс (см. рис. 2).

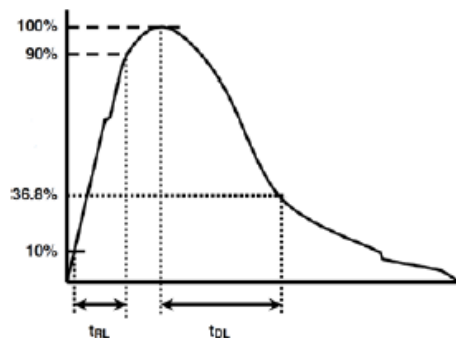


Рис. 2. Форма импульса разрядного тока ( $I_{PEAK}$ ) при испытаниях ИС на стойкость к ЭСР по методу 3015.7

Согласно методу 3015.7, все выводы ИС (выводы «Вход/Выход» (I/O), «Земля» (GND) и «Питание» (VDD)) подвергаются воздействию трех импульсов  $V_{SS}$  положительной и отрицательной полярности с интервалом 1 с.

После испытаний на стойкость к ЭСР проводят замер токов утечек на всех выводах ИС. Если установлено, что ток утечки на каком-либо выводе превышает допустимую величину, то это рассматривается как отказ ИС.

Так, на рис. 3 приведены результаты испытаний ИС на стойкость к воздействию ЭСР компании XILINX [8].

Несмотря на то, что метод 3015.7 является лишь одним из методов измерения чувствительности ИС к воздействию ЭСР, но в силу его широкого распространения его результаты могут использоваться в математической модели интенсивности отказов ( $\lambda_{EOS}$ ) при построении функции распределения чувствительности ИС к воздействию электрических перегрузок.

Обоснованием возможности использования такого подхода является и то, что чувствительность ИС к воздействию электрических перегрузок и пороговое напряжения (уровень чувствительности ИС к воздействию ЭСР) сильно коррелированы.

Таким образом, в методе моделирования интенсивности отказов из-за воздействия электрических перегрузок, приведенном в RADS-TR-89-177 [6], отказы КМОП ИС рассматриваются только как

результат катастрофических воздействий окружающей электрической среды и чувствительности ИС к их воздействию.

Device	Latch-up	Human Body Model Passing Voltage
XC4VLX15	pass	±2,000V
XC4VLX25	pass	±2,000V
XC4VLX40	pass	±2,000V
XC4VLX60	pass	±2,000V
XC4VLX80	pass	±2,000V
XC4VLX100	pass	±2,000V
XC4VLX160	pass	±2,000V
XC4VLX200	pass	±2,000V
XC4VSX25	pass	±2,000V
XC4VSX35	pass	±2,000V
XC4VSX55	pass	±2,000V

Рис. 3. Результаты испытаний ИС на стойкость к воздействию ЭСР

Исходя из выше изложенного, в основу модели  $\lambda_{EOS}$  положено следующее соотношение:

$$P(f) = P(c) \cdot P(f|c), \quad (1)$$

где:  $P(f)$  – вероятность отказа ИС из-за воздействия ЭСР;  $P(c)$  – вероятность контакта ИС с источником ЭСР;  $P(f|c)$  – вероятность отказа ИС из-за воздействия ЭСР при контакте с источником ЭСР.

Для получения вероятности  $P(f|c)$  были использованы данные, которые характеризуют распределение порогового напряжения ( $v_{TH}$ ) для всех классов микросхем (в т.ч. с защитой от ЭСР).

На рис. 4 показаны типовые встроенные схемы защиты цифровых КМОП ИС от ЭСР, которые обеспечивают быстрый отвод разрядного тока и рассеивание тепла.

В работе [9] показано, что распределение порогового напряжения ИС можно аппроксимировать логнормальным распределением со средним значением ( $V_{50TH}$ ), равным 2200 В:

$$f(v_{TH}) = \frac{1}{v_{TH} \cdot \sigma_{v_{TH}} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln v_{TH} - \ln V_{50TH})^2}{2\sigma_{v_{TH}}^2}}. \quad (1)$$

На рис. 5 приведен график функции (1).

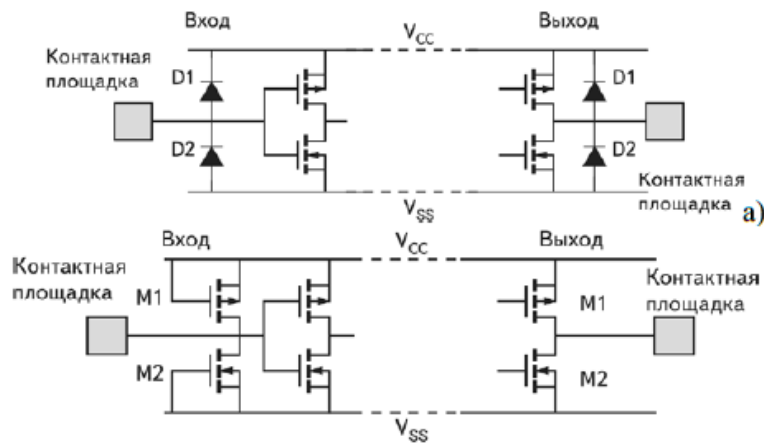
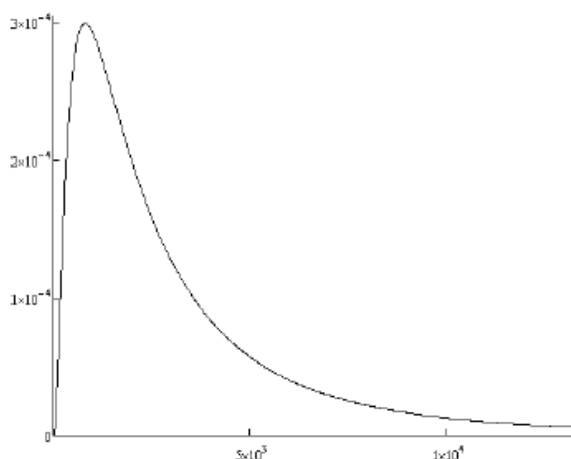


Рис. 4. Типовые встроенные схемы защиты цифровых КМОП ИС от ЭСР: а) на диодах; б) на КМОП-транзисторах

Рис. 5. График функции  $f(v_{TH})$  по модели (1)

В работе [10] были получены значения моментов напряжения  $v_{TH}$  в предположении его нормального распределения:

$$f(v_{TH}) = \frac{1}{\sigma(v_{TH}) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(v_{TH} - m(v_{TH}))^2}{2\sigma(v_{TH})^2}}. \quad (2)$$

В табл. 1 представлены значения параметров распределения (2) для типовых исполнений ИС, полученные в работе [4].

Таблица 1

Параметры распределения  $V_{TH}$

Моменты $V_{TH}$	Исполнение ИС		Среднее
	Без защиты от ЭСР	С защитой от ЭСР	
1	2	3	4
$m(v_{TH}), В$	1175	8000	4588
$\sigma(v_{TH}), В$	375	1750	1790

Исходя из того, что нормальное распределение является бесконечно делимым, а случайные величины  $v_{TH}$  ИС без защиты от ЭСР ( $v_{TH_1}$ ) и с защитой от ЭСР ( $v_{TH_2}$ ) независимы и имеют нормальное распределение (2), следует, что случайная величина  $v_{TH_3} = \frac{v_{TH_1} + v_{TH_2}}{2}$  также имеет нормальное распределение с математическим ожиданием, равным:

$$m(v_{TH_3}) = \frac{m(v_{TH_1}) + m(v_{TH_2})}{2}.$$

В столбце 4 табл. 1 приведены значения параметров распределения случайной величины  $v_{TH_3}$ .

На рис. 6 приведены графики функции (2) для значений ее параметров, приведенных в табл. 1.

Выборка, на основе которой в работе [10] значения параметров распределения (2) были получены, и выборка, на основе которой в работе [11] средняя интенсивность отказов ( $\Lambda_{EOS}$ ) из-за воздействия ЭСР была рассчитана, должны быть очень похожи, так как они являются репрезентативными для обеспечения хорошего усреднения по типам, технологиям и окружающим электрическим средам.

Именно поэтому значение  $m(v_{TH_3})$  было использовано в качестве параметра распределения  $v_{TH}$ , на основе которого была получено значение усредненной интенсивности отказов ( $\Theta$ ) из-за воздействия ЭСР.

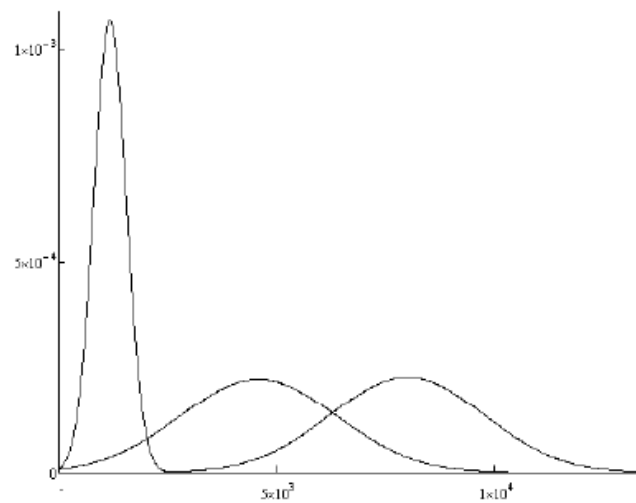


Рис. 6. Графики функций  $f(v_{TH})$  по модели (2) для  $v_{TH} = v_{TH_1}$ ,  $v_{TH} = v_{TH_3}$  и  $v_{TH} = v_{TH_2}$

Можно предположить, что распределение  $v_{TH}$  не является нормальным распределением (см. рис. 6), каковое было принято в работе [10], а, скорее, является логарифмически-нормальным распределением (см. рис. 5), которое принято в работе [9], или экспоненциальным распределением:

$$f(v_{TH}) = \Theta \cdot e^{-\Theta \cdot v_{TH}}. \quad (3)$$

Экспоненциальное распределение интуитивно понятно и более адекватно, поскольку плотность вероятности отказа ИС из-за воздействия электрических перегрузок возрастает при снижении ее порогового напряжения (см. рис. 7).

Предполагая, что распределение порогового напряжения является экспоненциальным распределением (3), и используя среднее значение математического ожидания напряжения  $v_{TH}$  (см. табл. 1), для показателя экспоненты ( $\Theta = 1 / m(v_{TH_3})$ ) получается значение  $\Theta$  равное  $0,0002 \text{ В}^{-1}$  и, соответственно, следующая функция плотности вероятности  $v_{TH}$ :

$$f(v_{TH}) = 0,0002 \cdot e^{-0,0002 \cdot v_{TH}}. \quad (4)$$

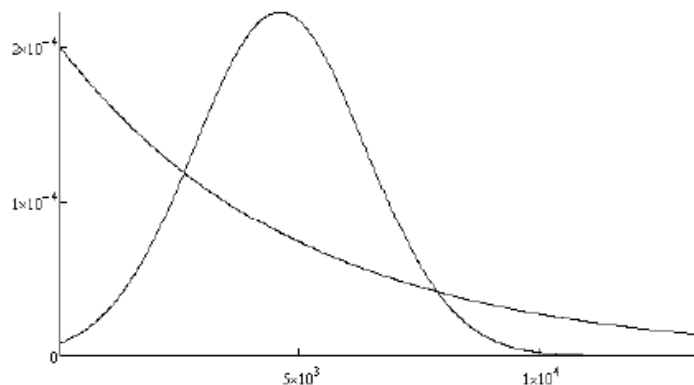


Рис. 7. Графики функций  $f(v_{TH})$  по модели (2) и модели (3)

Несмотря на тот очевидный факт, что окружающая электрическая среда, в которой функционирует ИС, является главным фактором отказов из-за воздействия электрических перегрузок, ее характеристики не могут быть использована в модели  $\lambda_{EOS}$ , поскольку изготовители РЭА, как правило, не имеют достоверных данных об этих характеристиках, позволяющих оценить вероятность возникновения электрических перегрузок.

Например, в авиационном электронном оборудовании наблюдается большое число отказов ИС из-за воздействия электрических перегрузок, несмотря на то, что характеристики электропитания оборудования известны. Это лишний раз подтверждает то, что количественная оценка величины уровня воздействия электрических перегрузок в зависимости от характеристик окружающей электрической среды является сложной задачей и в RADS-TR-89-177 [6] такая задача не рассматривалась. Поэтому при разработке модели  $\lambda_{EOS}$  была получена только её зависимость от порогового напряжения ИС к воздействию ЭСР вида (4).

Для оценки значения  $P(c)$  в RADS-TR-89-177 [6] использованы усредненные значения порогового напряжения и интенсивности отказов, полученные РАС [9, 11], и равные, соответственно,  $V_{50TH}$  и  $\Lambda_{EOS}$  ( $\Lambda_{EOS} = 0,0419 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ ). В этом случае значение  $P(c)$  за время  $T = 0,00876 \cdot 10^6$  часов (1 год) составит:

$$P(c) = \frac{1 - e^{-\Lambda_{EOS} \cdot T}}{\int_0^{V_{50TH}} 0,0002 \cdot e^{-0,0002 \cdot v_{TH}} dv_{TH}} = 0,00057. \quad (5)$$

Тогда:

$$P(f) = 1 - e^{-\lambda_{EOS} \cdot t} = 1 - 0,00057 \cdot e^{-0,0002 \cdot V_{TH}}. \quad (6)$$

Разрешив (6) относительно  $\lambda_{EOS}$  для  $t = 0,00876 \cdot 10^6$  часов (1 год) получают итоговую математическую модель  $\lambda_{EOS}$ :

$$\lambda_{EOS} \cdot 10^6 = \frac{-\ln(1 - 0,00057 \cdot e^{-0,0002 \cdot V_{TH}})}{0,00876}. \quad (7)$$

На рис. 8 приведен график зависимости  $\lambda_{EOS}$  от  $V_{TH}$ .

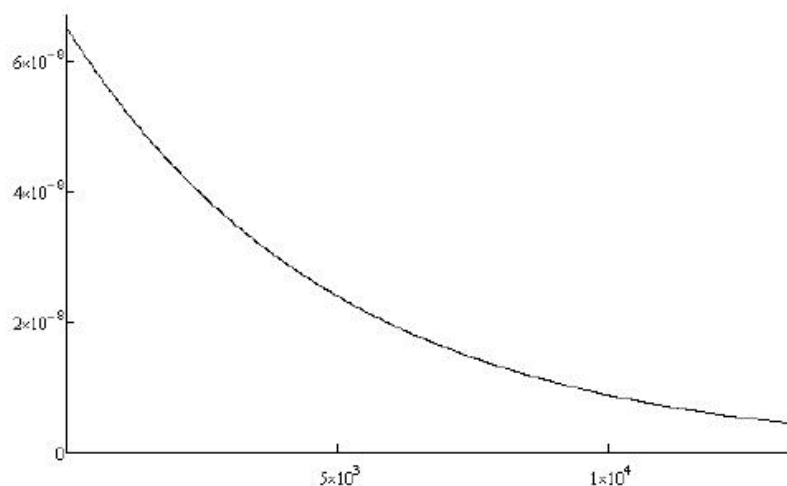


Рис. 8. График зависимости  $\lambda_{EOS}$  от  $V_{TH}$

Несмотря на то, что численные значения коэффициентов модели (7) основаны на статистических данных по пороговому напряжению ИС и их интенсивности отказов из-за воздействия катастрофических электрических перегрузок, полученных в 80-х годах прошлого века [9–11], она применяется до настоящего времени. Так, модель (7) входит в математические модели интенсивностей от-

казов КМОП СБИС, рекомендованные в американских справочниках по прогнозированию надежности электронного оборудования [3, 4], для учета влияния отказов из-за воздействия ЭСР.

Однако, усреднение численных значений коэффициентов модели (7) дает при расчетах адекватные результаты, если РЭА функционирует в окружающей электрической среде, для которой трудно оценить вероятность возникновения электрических перегрузок, а также содержит большое количество разнотипных ИС.

#### Пример использования метода

Возможность использования приведенного выше метода формирования математической модели интенсивности отказов рассмотрим на примере КМОП СБИС, применяемых в бортовой аппаратуре КА, эксплуатируемых на геостационарных или высокоэллиптических орбитах.

Такие КА регулярно становятся объектами воздействия космической плазмы во время и после геомагнитных бурь и суббурь в магнитосфере Земли, что приводит к электризации КА и возникновению ЭСР [12].

Для характеристики интенсивности геомагнитной бури обычно используется  $D_{ST}$ -индекс. На рис. 9 приведена классификация бурь за 37 лет на основе  $D_{ST}$ -индекса, измеренного в 1957–1993 г.г. [13].

Так как ЭСР обычно возникает на таких орбитах КА при бурях со значением  $D_{ST} < -100$ , то используя данные, приведенные на рис. 9, и учитывая, что в соответствии с (5) распределение времени до отказа ИС из-за воздействия электрических перегрузок является экспоненциальным, можно определить значение  $P(c)$  за 1 год:

$$P(c) = 1 - e^{-\frac{-\ln\left(1 - \frac{257}{1085}\right)}{37}} = 0,00728. \quad (8)$$

Кроме того, поскольку современные КМОП СБИС выполняются с защитой от ЭСР, то и усреднять значение коэффициента  $\Theta$  в модели (3) нет необходимости, тем более что для оценки значения  $P(c)$  в (8) не использовались значения  $V_{50\text{TH}}$  и  $\Lambda_{EOS}$ . С учетом этих замечаний получаем следующую модель интенсивности отказов:

$$\lambda_{EOS} \cdot 10^6 = \frac{-\ln\left(1 - 0,00728 \cdot e^{-0,000125 \cdot V_{TH}}\right)}{0,00876}.$$

Класс бури	Кол-во бурь	Процент	$D_{st}$ , нТ
Слабые (Weak)	482	44	-30... -50
Умеренные (Moderate)	346	32	-50...-100
Сильные (Strong)	206	19	-100...-200
Экстремальные (Severe)	45	4	-200...-350
Выдающиеся (Great)	6	1	< -350

Рис. 9. Классификация бурь на основе  $D_{st}$ -индекса

#### Заключение

Таким образом, метод оценки численных значений коэффициентов модели  $\lambda_{EOS}$ , приведенный в RADS-TR-89-177 [6], может быть использован для уточнения этих значений в тех случаях, если можно оценить вероятность возникновения ЭСР, как, например, для аппаратуры КА, эксплуатируемых на геостационарных или высокоэллиптических орбитах.

## Список литературы

1. Надежность ЭРИ: Справочник. – М.: МО РФ, 2006.
2. Надежность ЭРИ ИП: Справочник. – М.: МО РФ, 2006.
3. MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment. – USA: DoD, 1995.
4. RIAC-HDBK-217Plus. Hand book of 217Plus™ reliability prediction models. – USA: RIAC, 2006.
5. Абрамешин, А.Е. Расчётная оценка надёжности электронных модулей аппаратуры космических аппаратов. / А.Е. Абрамешин, В.В. Жаднов, И.В. Жаднов. // Технологии ЭМС. – 2012. – № 1. – С. 29–33.
6. RADS-TR-89-177. VHSIC/VHSIC-LIKE reliability prediction modeling. – USA: RADS, 1989.
7. MIL-STD 883D. Method 3015.7. Military Standard for Test Methods and Procedures Microelectronics: ESD Sensitivity Classification.
8. UG116 (v 9.3). Device reliability report: Fourth quarter 2012. – XILINX, 2013.
9. VZAP-1. Electrostatic discharge susceptibility of electronic device. – Reliability analysis center publication, 1983.
10. Giusti, J. The probability of an ESD failure in unprotected equipment. / J. Giusti. // Electrical overstress/Electrostatic discharge symposium proceedings, 1986.
11. MDR-21. Microcircuit device reliability trend analysis. – Reliability analysis center publication, 1985.
12. Кечиев, Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. / Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев. – М.: ИД «Технологии», 2005. – 352 с.
13. Ермолаев, Ю.И. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды. / Ю.И. Ермолаев, М.Ю. Ермолаев. // Геофизические процессы и биосфера. – 2009. – т. 8. – № 1. – С. 5–35.

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2014 году.

*Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики  
Статья получена 12.10 2013*

*Abrameshin A.E., Zhadnov V.V.*

### **Modeling failure rate of microcircuits of the onboard space equipment because of influence of the electrostatic discharge**

Indicators of non-failure operation of the onboard space equipment substantially depend on characteristics of reliability microcircuits. One of possible causes of failures microcircuits is influence of catastrophic electrical overstress owing to electrostatic discharges. In article the method of formation of mathematical model of failure rate microcircuits and possibility of its application for microcircuits for the equipment of the spacecrafts operated in geostationary or high-elliptic orbits is considered.

**Key word: electrostatic discharge, microcircuits, failure rate**

*National Research University Higher School of Economics*