

$$\begin{aligned}M_{MIN} &= [0,2^\circ; 0,3^\circ; 0,3^\circ], \\M_{MAX} &= [6,3^\circ; 2,0^\circ; 7,0^\circ], \\M_{AVG} &= [1,8^\circ; 1,1^\circ; 1,9^\circ], \\V_{AVG} &= [0,4^\circ; 0,10^\circ; 0,4^\circ].\end{aligned}$$

Анализ результатов применимости метода в условиях городской застройки демонстрирует принципиальную возможность его использования. При этом изображение, вычисление углов Эйлера по которому дает максимальную ошибку для всех трех углов (рис. 2) требует дополнительного анализа. Невысокую точность дают изображения зданий и сооружений неправильной формы. Можно рекомендовать исключить такие объекты при ориентации объекта на заранее выбранном маршруте. Еще одной причиной низкой точности вычисления углов Эйлера служила регистрация изображений некалиброванной камерой, что также нужно учесть.

В перспективе предполагает провести анализ выбросов в выборках оценок погрешностей вычисления углов Эйлера, а также провести анализ возможности применения подхода при ориентации в природной среде.

Литература

1. Хуттунен В., Пише Р. Гироскоп на основе монокулярной камеры// Гироскопия и навигация. 2012. №2(77). С. 69-80.
2. Grompone von Gioi Rafael and Jakubowicz, Jérémie and Morel, Jean-Michel and Randall, Gregory LSD: a Line Segment Detector // IPOL Journal — Image Processing On Line: IPOL Journal · Image Processing On Line, 2012. P. 35–55 : Т. 2.
3. Fischler Martin A. и Bolles Robert C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography// Communications of the ACM: ACM New York, USA, 1981. P. 381–395 : Т. 24.
4. The York Urban Line Segment Database // Elder Laboratory: Human & Computer Vision. 2015. Available at.: <http://www.elderlab.yorku.ca/YorkUrbanDB/> (accessed 15.06.2015)
5. Домрачева А.Б. Анализ точности определения трехмерной ориентации монокулярной камеры с использованием точек схождения перспективы, обнаруженных в серии изображений// Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2014. №1. С.220-223.

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ БОРТОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Абрамешин А.Е., Жаднов В.В.
Москва, НИУ ВШЭ

Одной из возможных причин отказов интегральных схем бортовой космической аппаратуры является воздействие электростатических разрядов. В докладе рассматривается метод формирования математической модели интенсивности отказов интегральных схем и его применение для интегральных схем аппаратуры космических аппаратов, эксплуатируемых на геостационарных орбитах.

Evaluation of the failure rate of integrated circuits onboard space equipment when subjected to electrostatic discharges. Abrameshin A., Zhadnov V.

One of the possible causes of failures of integrated circuits on board space equipment is exposure to electrostatic discharges. The article describes a method of forming a mathematical model of the failure rate of integrated circuits and its application to integrated circuits equipment spacecraft operated in geostationary orbits.

В моделях интенсивностей отказов интегральных схем (ИС), приведенных в отечественном справочнике [1] нет коэффициентов, учитывающих влияние стойкости ИС (порогового напряжения - V_{TH}) к воздействию напряжения (V_{SS}) электростатических разрядов (ЭСР), т.е. предполагается, что если при разработке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) выполнено условие:

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

то вероятность отказа ИС из-за воздействия ЭСР пренебрежимо мала [2]. Однако у ИС аппаратуры космических аппаратов (КА), эксплуатируемых на геостационарных или высокоэллиптических орбитах, наблюдается значительное число отказов из-за воздействия ЭСР.

Отказы из-за воздействия ЭСР на 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 ЭСР, не зависит от степени интеграции и определяется реальным уровнем стойкости конкретной ИС (за счет соответствующих схемотехнических и технологических решений) и условиями ее применения (характеристиками окружающей электрической среды), зависящими только от изготовителя РЭА.

Поскольку отказы из-за воздействия ЭСР 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 [3], метод 3015 - Human Body Mode. 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 (λ_{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 [4], отказы КМОП ИС рассматриваются только как результат катастрофических воздействий окружающей электрической среды и чувствительности ИС к их воздействию. Исходя из выше изложенного, в основу модели λ_{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). Можно предположить, что распределение v_{TH} не является нормальным распределением, каковое было принято в работе [5], а, скорее, является логарифмически-нормальным распределением, которое принято в работе [6], 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.

Предполагая, что распределение порогового напряжения является экспоненциальным распределением (3), и используя среднее значение математического ожидания напряжения v_{TH} ,

приведенное в работе [5] для показателя экспоненты $\left(\Theta = \frac{1}{m(v_{TH_3})} \right)$ получается значение Θ равное 0,0002 В⁻¹ и, соответственно, следующая функция плотности вероятности v_{TH} :

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

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 λ_{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 [4] такая задача не рассматривалась. Поэтому при разработке модели λ_{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 [4] использованы усредненные значения порогового напряжения и интенсивности отказов, полученные РАС [6, 7], и равные, соответственно, V_{50TH} и Λ_{EOS} ($\Lambda_{EOS} = 0,0419 \cdot 10^{-6}$ 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 λ_{EOS} для $t = 0,00876 \cdot 10^6$ часов (1 год) получают итоговую математическую модель λ_{EOS} :

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

В заключении следует отметить, что метод оценки численных значений коэффициентов модели λ_{EOS} , приведенный в RADS-TR-89-177 [4], может быть использован для уточнения этих значений в тех случаях, если можно оценить вероятность возникновения ЭСР. Так, в работе [8] показано, что для аппаратуры КА, эксплуатируемых на геостационарных или высокоэллиптических орбитах, модель (7) может быть представлена в следующем виде:

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

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2015 году.

Литература

1. Надежность ЭРИ: Справочник. - М.: МО РФ, 2006.
2. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Жаднов И.В. Расчётная оценка надёжности электронных модулей аппаратуры космических аппаратов. / Технологии ЭМС. - 2012. - № 1. - с. 29-33.
3. MIL-STD 883D. Method 3015.7. Military Standard for Test Methods and Procedures Microelectronics: ESD Sensitivity Classification.
4. RADS-TR-89-177. VHSIC/VHSIC-LIKE reliability prediction modeling. - USA: RADS, 1989.
5. Giusti J. The probability of an ESD failure in unprotected equipment. / Electrical overstress/Electrostatic discharge symposium proceedings, 1986.
6. MDR-21. Microcircuit device reliability trend analysis. - Reliability analysis center publication, 1985.
7. VZAP-1. Electrostatic discharge susceptibility of electronic device. - Reliability analysis center publication, 1983.
8. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В. Моделирование интенсивности отказов интегральных схем бортовой космической аппаратуры из-за воздействия электростатических разрядов. / Технологии электромагнитной совместимости. - 2014. - № 2. - с. 27-34.