

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТОЙКОСТИ ИС К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭСР

О. Е. Малинова, В. В. Жаднов (научный руководитель)

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, Москва, ул. Мясницкая, 20
E-mail: oemalinova@edu.hse.ru*

Интегральные схемы, применяемые в составе аппаратуры автоматизированных систем, в значительной степени подвержены разрушающему воздействию электростатических разрядов, порождающих электрические перегрузки. Поэтому при оценке надежности аппаратуры этого класса необходимо особое внимание уделять характеристикам безотказности интегральных схем. Данная статья посвящена рассмотрению математических моделей вероятности безотказной работы интегральных схем при воздействии электростатических разрядов.

Для учета влияния воздействия электростатических разрядов (ЭСР) на надежность КМОП ИС в их математические модели интенсивностей отказов введено слагаемое λ_{EOS} , показывающее, на сколько возрастает интенсивность отказов ИС при воздействии ЭСР [1]. Обоснование метода формирования математической модели λ_{EOS} приведено в [2] и рассмотрено в [3, 4]. Одним из составляющих модели λ_{EOS} является вероятность отказа ИС при контакте с источником ЭСР – $P(f|c)$:

$$P(f|c) = \int_0^{V_{TH}} f(v_{TH}) dv_{TH}, \quad (1)$$

где V_{TH} – стойкость ИС к воздействию ЭСР по ТУ; $f(v_{TH})$ – плотность вероятности стойкости ИС к воздействию ЭСР.

В [5] по результатам испытаний ИС разного исполнения (с защитой и без защиты от ЭСР) было показано, что $f(v_{TH})$ можно аппроксимировать логнормальным распределением:

$$f_2(v_{TH}) = \frac{1}{v_{TH} \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\left[\frac{\ln v_{TH} - \mu(V_{TH50})}{\sigma} \right]^2}{2}}, \quad (2)$$

где $\mu(V_{TH50})$, σ – параметры распределения.

При этом в качестве f_1 в [2] было принято экспоненциальное распределение:

$$f_1(v_{TH}) = \eta \cdot e^{-\eta v_{TH}}, \quad (3)$$

где η – параметр распределения; v_{TH} – стойкость ИС.

Значение η в [2] было определено по результатам испытаний ИС на стойкость к ЭСР, которые были получены в [6] в предположении нормального распределения v_{TH} :

$$f(v_{TH}) = \frac{1}{\sigma(v_{TH}) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\left[\frac{v_{TH} - m(v_{TH})}{\sigma(v_{TH})} \right]^2}{2}}, \quad (4)$$

где $m(v_{TH})$, $\sigma(v_{TH})$ – параметры распределения.

Численные значения параметров распределения (4), полученные в [6] для двух видов исполнения ИС, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Значения параметров распределения v_{TH}

№ п/п	Исполнение ИС	Моменты v_{TH} , кВ	
		$m(v_{TH})$	$\sigma(v_{TH})$
1	2	3	4
1	Без защиты от ЭСР	1,175	0,375
2	С защитой от ЭСР	8	1,75

Отметим, что при использовании этих данных для ИС различного исполнения (с защитой и без защиты от ЭСР) значение плотности вероятности будет равно:

$$f_3(v_{TH}) = \frac{f(v_{TH})_1 + f(v_{TH})_2}{2}, \quad (5)$$

где $f(v_{TH})_1$ – плотность вероятности стойкости ИС без защиты от ЭСР; $f(v_{TH})_2$ – плотность вероятности стойкости ИС с защитой от ЭСР.

В [2] для модели (3) значение η для ИС различного исполнения (с защитой и без защиты от ЭСР) определялось как

$$\eta = \frac{1}{\Theta}, \quad (6)$$

где Θ – среднее значение стойкости ИС.

Для обеспечения хорошего усреднения данных по уровням воздействия ЭСР, видам ИС и технологиям их производства, выборка, на основе которой в [6] были получены значения параметров распределения (4), и выборка, на основе которой в [7] была рассчитана средняя интенсивность отказов (Λ_{EOS}) аппаратуры из-за воздействия ЭСР, должны быть очень схожи. Поэтому в [2] значение Θ определялось как

$$\Theta = \frac{m(v_{TH})_1 + m(v_{TH})_2}{2}, \quad (7)$$

где $m(v_{TH})_1$ – математическое ожидание стойкости ИС без защиты от ЭСР; $m(v_{TH})_2$ – математическое ожидание стойкости ИС с защитой от ЭСР.

На рис. 1 приведены графики зависимости плотности вероятности f_1 , f_2 и f_3 . Как видно из рисунка, с увеличением стойкости ИС вероятность ее отказа из-за воздействия ЭСР снижается.

Расчет вероятности отказа ИС при воздействии ЭСР проводится по формуле [2]:

$$P(f) = P(c) \cdot P(f|c), \quad (8)$$

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

На рис. 2 приведен график зависимости вероятности отказа от стойкости ИС по модели (3).

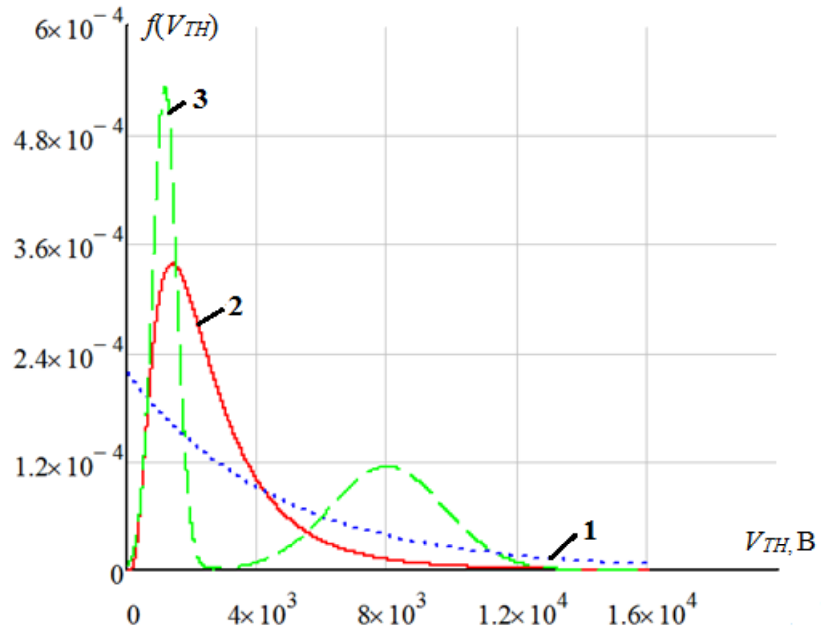


Рис. 1. Плотность вероятности: 1 – f_1 , 2 – f_2 , 3 – f_3

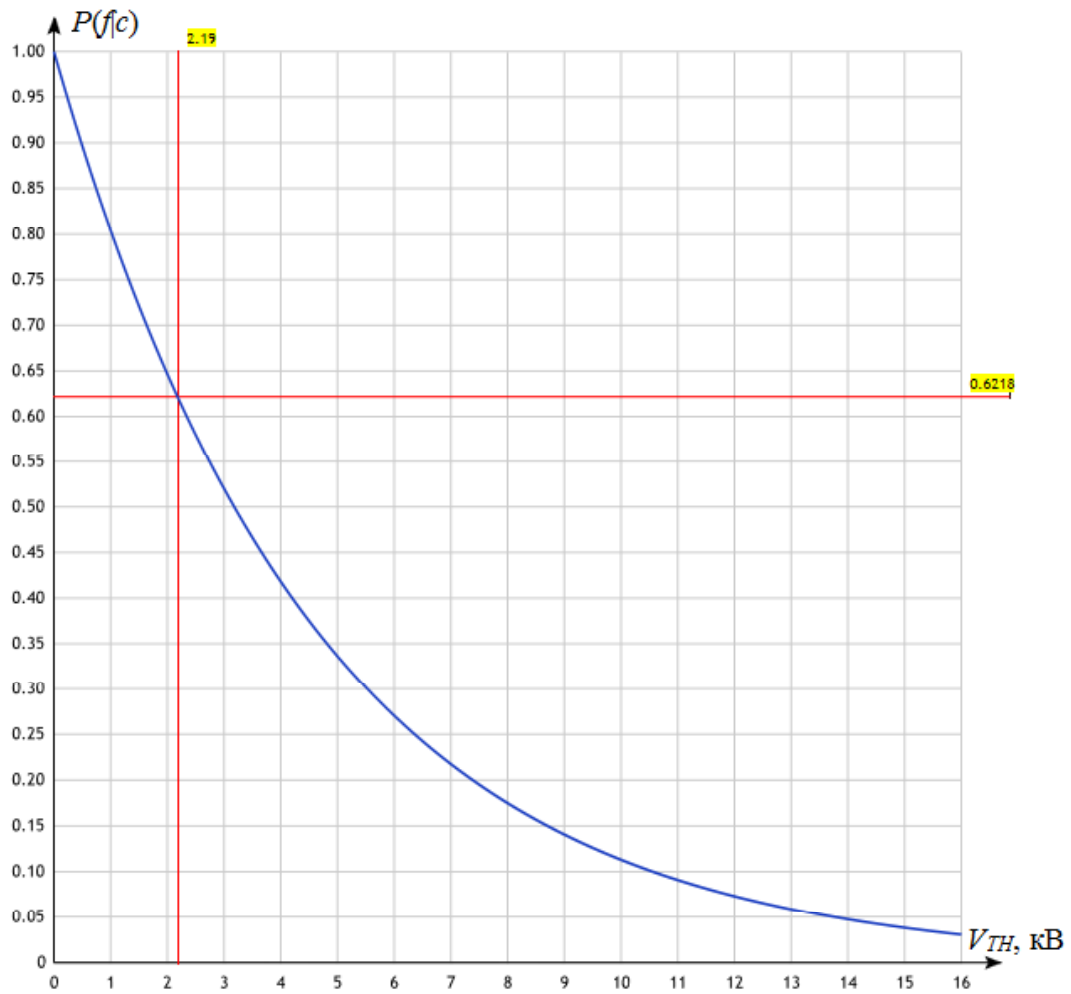


Рис. 2. Зависимость $P(f_c)$ от V_{TH}

В [2] для оценки вероятности контакта ИС с источником ЭСР используется значение $P(f|c)$, рассчитанное для полученного в [5] значения $V_{TH50} = 2,2$ кВ:

$$P(f|c) = \int_0^{2,2} \frac{2}{1,175 + 8} \cdot e^{-\frac{2}{1,175+8} v_{TH}} dv_{TH} = 0,619.$$

Однако это значение $P(f|c)$ достаточно велико. При этом значение $P(c)$, полученное в [2] на основе усредненных данных [5–7], составило $5,7 \cdot 10^{-4}$, а полученное в [3] на основе статистики геомагнитных бурь и суббурь в магнитосфере Земли, которые приводят к электризации космических аппаратов и возникновению ЭСР [8], составило $7,8 \cdot 10^{-3}$. Вместе с тем для аппаратуры автоматизированных систем, с которой постоянно контактирует оператор, значение $P(c)$ близко к 1. Поэтому для такой аппаратуры для снижения значения $P(c)$ необходимо применять дополнительную (внешнюю) защиту. В этом случае (8) должна быть представлена в виде

$$P(f) = [1 - P_{в.з}(t)] \cdot P(f|c), \quad (9)$$

где $P_{в.з}$ – вероятность безотказной работы внешней защиты от ЭСР; $P(f|c)$ – вероятность отказа ИС при контакте с источником ЭСР; t – время эксплуатации аппаратуры.

Также следует отметить, что при увеличении Θ (например, если в аппаратуре применяются ИС только с защитой от ЭСР) значение $P(f|c)$ так же будет возрастать. Чтобы избежать этого противоречия и исходя из того, что Θ определено по результатам испытаний, его значение можно интерпретировать как среднее значение напряжения ЭСР, действующего на ИС. Тогда $P(f|c)$ можно представить в виде

$$P(f|c) = e^{-\frac{1}{V_{ЭСР}} V_{TH}}, \quad (10)$$

где $V_{ЭСР}$ – напряжение ЭСР, действующее на ИС; V_{TH} – стойкость ИС к воздействию ЭСР по ТУ.

В этом случае значение $V_{ЭСР}$ будет численно равно напряжению, на которое рассчитано внешнее устройство защиты. Например, если в качестве такого устройства применяют защиту на TVS-диоде [9], то вероятность отказа ИС будет равна:

$$P(f) = (1 - e^{-\lambda_{э} t}) \cdot e^{-\frac{1}{V_{TVS}} V_{TH}}, \quad (11)$$

где $\lambda_{э}$ – эксплуатационная интенсивность отказов TVS-диода; V_{TVS} – напряжение TVS-диода по ТУ; V_{TH} – стойкость ИС к воздействию ЭСР по ТУ; t – время эксплуатации аппаратуры.

Значение $\lambda_{э}$ рассчитывается по модели, приведенной в [1].

Таким образом, обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что при оценке характеристик безотказности ИС, применяемых в аппаратуре автоматизированных систем, с которой постоянно контактирует оператор, необходимо учитывать не только стойкость ИС к воздействию ЭСР, но и показатели надежности внешней защиты.

Список литературы

1. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. USA: DoD, 1991. 205 p.
2. RADS-TR-89-177. VHSIC/VHSIC-LIKE Reliability Prediction Modeling. USA: RADS, 1989. 11 p.
3. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Жаднов И.В. Моделирование интенсивности отказов интегральных схем бортовой космической аппаратуры из-за воздействия электростатических разрядов // Технологии электромагнитной совместимости. 2014. № 2. С. 27–34.
4. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В. Оценка интенсивности отказов интегральных схем бортовой космической аппаратуры при воздействии электростатических разрядов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. М.: НИУ ВШЭ, 2015. С. 377–380. Т. 1.
5. VZAP-1. Electrostatic Discharge Susceptibility of Electronic Device. Reliability Analysis Center Publication, 1983.
6. J. Giusti J. The Probability of an ESD Failure in Unprotected Equipment // Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 1986.
7. MDR-21. Microcircuit Device Reliability Trend Analysis. Reliability Analysis Center Publication, 1985.
8. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М.: ИД «Технологии», 2005. 352 с.
9. Кадуков А. TVS-диоды – полупроводниковые приборы для ограничения опасных перенапряжений в электронных цепях // Компоненты и технологии. 2001. № 1. С. 32–36.