

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ КМОП ИС

Жаднов В.В.

Расчеты надежности радиоэлектронной аппаратуры проводятся по методикам стандарта [1], в котором для расчетов интенсивности отказов электронных модулей 1-го уровня рекомендовано использование справочника [2]. Математическая модель интенсивности отказов КМОП ИС приведенная в этом справочнике имеет вид:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma} \cdot K_{c.t} \cdot K_{корп} \cdot K_v \cdot K_{\Sigma} \cdot K_{пр}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\Sigma}$  - базовая интенсивность отказов;  $K_{c.t}$  - коэффициент, учитывающий сложность ИС и температуру окружающей среды;  $K_{корп}$  - коэффициент, учитывающий тип корпуса ИС;  $K_v$  - коэффициент, учитывающий величину напряжения питания КМОП ИС  $K_{\Sigma}$  - коэффициент, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации;  $K_{пр}$  - коэффициент, учитывающий степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки.

Как следует из (1) в модели интенсивности отказов КМОП ИС не учитывается влияния воздействия электростатических разрядов (ЭСР) на их надежность. Поэтому при использовании модели (1) разработчик аппаратуры должен либо применять КМОП ИС с высокой стойкостью к воздействию ЭСР, либо обеспечить им 100% защиту от их воздействия. Очевидно, что этого на практике добиться невозможно, что обусловлено как разбросом стойкости КМОП ИС к воздействию ЭСР ( $V_{TH}$ ), так и ненадежностью схем защиты. Это подтверждается и статистикой отказов КМОП ИС в аппаратуре из-за воздействия ЭСР.

В отличие от справочника [2] в стандарте [3] приведена математическая модель интенсивности отказов КМОП СБИС, учитывающая воздействие ЭСР:

$$\lambda_p = \lambda_{BD} \cdot \pi_{MGF} \cdot \pi_T \cdot \pi_{CD} + \lambda_{BP} \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_{PT} + \lambda_{EOS}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{BD}$  - базовая интенсивность отказов кристалла;  $\pi_{MGF}$  - коэффициент, учитывающий степень освоения производства СБИС;  $\pi_T$  - коэффициент, учитывающий влияние рабочей температуры;  $\pi_{CD}$  - коэффициент, учитывающий сложность СБИС;  $\lambda_{BP}$  - базовая интенсивность отказов корпуса;  $\pi_E$  - коэффициент, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации;  $\pi_Q$  - коэффициент, учитывающий уровень качества СБИС;  $\pi_{PT}$  - коэффициент, учитывающий тип корпуса СБИС;  $\lambda_{EOS}$  - интенсивность отказов, обусловленная воздействием ЭСР.

Значение  $\lambda_{EOS}$  в (2) рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{EOS} = - \frac{\ln(1 - P(c) \cdot e^{-P(fc)V_{TH}})}{8,76 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

где  $P(c) = 5,7 \cdot 10^{-4}$ ;  $P(fc) = 2 \cdot 10^{-4}$  - постоянные коэффициенты;  $V_{TH}$  - стойкость КМОП ИС к воздействию ЭСР по ТУ.

График зависимости  $\lambda_{EOS}$  от  $V_{TH}$  показан на рис. 1.

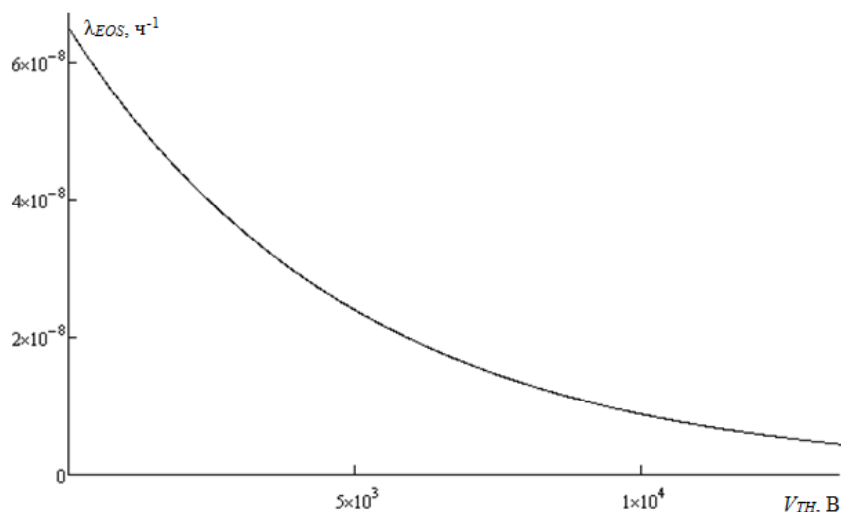


Рис. 1. Зависимость  $\lambda_{EOS}$  от  $V_{TH}$

Обоснование метода формирования модели (3) приведено в [4] и подробно рассмотрено в [5]. Следует отметить, что хотя численные значения коэффициентов  $P(c)$  и  $P(fc)$  в модели (3) рассчитаны на основе статистики отказов КМОП ИС, полученной в 80-х годах прошлого века, эта модель без изменений вошла в справочник [6] и в программные средства расчетов надежности, реализующие модели стандарта [3] и справочника [6].

Однако в [5] показано, что поскольку для расчета коэффициентов модели (3) использовались усредненные значения  $V_{TH}$ , то она позволяет получить адекватные результаты при расчете надежности аппаратуры, которая содержит большое число разнотипных КМОП ИС (с защитой и без защиты от ЭСР) и функционирует в окружающей электрической среде, для которой трудно оценить вероятность возникновения контактов КМОП ИС с источниками ЭСР -  $P(c)$ .

Поэтому значения коэффициентов модели (3) следует уточнять, если имеется информация об окружающей электрической среде, как, например, для КМОП ИС, применяемых в бортовой аппаратуре космических аппаратов (КА), которые эксплуатируются на геостационарных или высокоэллиптических орбитах. Поскольку 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 [7]. Для этого случая в [5] значение  $P(c)$  было получено на основе статистики этих геомагнитных бурь и суббурь и составило  $7,28 \cdot 10^{-3}$ .

Кроме того, в [4] для оценки вероятности контакта ИС с источником ЭСР используется значение  $P(fc)$ , рассчитанное для полученного в [8] значения  $V_{TH50} = 2,2$  кВ и равное 0,619. Однако это значение  $P(fc)$  достаточно велико. Поэтому очевидно, что в случае, если значение  $P(c)$  близко к 1 (например, для аппаратуры, с которой постоянно контактирует оператор), то для обеспечения низкого значения  $P(c)$  необходимо применять дополнительную (внешнюю) защиту. В этом случае значение  $P(c)$  будет численно равно вероятности отказа схемы защиты, которую можно рассчитать по методике стандарта [1]:

$$P(c) = 1 - P_{c3}(t); \quad (4)$$

$$P_{c3}(t) = e^{-\Lambda_{c3} t}; \quad (5)$$

$$\Lambda_{c3} = \sum_{i=1}^{I_{c3}} \Lambda_{\text{Э}i}, \quad (6)$$

где  $P_{сз}(t)$  – вероятность безотказной работы схемы защиты;  $\Lambda_{сз}$  – интенсивность отказов схемы защиты;  $t$  – время эксплуатации аппаратуры;  $\lambda_{эi}$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента схемы защиты;  $I_{сз}$  – количество элементов в схеме защиты.

Наличие внешней защиты также позволяет уточнить и значения  $P(f|c)$ , поскольку в этом случае известно напряжение ЭСР ( $V_{ESD}$ ), на которое рассчитана защита. Тогда значение  $P(f|c)$  будет равно:

$$P(f|c) = \int_0^{V_{ESD}} f(v_{TH}) dv_{TH}, \quad (7)$$

где  $f(v_{TH})$  – плотность вероятности стойкости ИС к воздействию ЭСР.

По результатам испытаний ИС на стойкость к ЭСР в [9] показано, что  $f(v_{TH})$  можно аппроксимировать нормальным распределением:

$$f(v_{TH}) = \frac{1}{y(v_{TH}) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{[v_{TH} - m(v_{TH})]^2}{2 \cdot y(v_{TH})^2}}. \quad (8)$$

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

Численные значения параметров распределения (8), полученные в [9] для двух видов исполнения ИС, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров распределения  $v_{TH}$

№ п/п	Исполнение ИС	$m(v_{TH})$	$\sigma(v_{TH})$	$v$
1	2	3	4	
1	Без защиты от ЭСР	1,175	0,375	0,319
2	С защитой от ЭСР	8	1,75	0,219

Поскольку в ТУ значений параметров распределений  $v_{TH}$  не приводится, то их ориентировочные значения можно получить в предположении, что коэффициент вариации ( $v$ ) является постоянной величиной, а значение  $V_{TH}$  определяется с вероятностью 0,9973. Тогда:

$$m(v_{TH}) = \frac{V_{TH}}{1 - 3 \cdot v}; \quad (9)$$

$$y(v_{TH}) = v \cdot m(v_{TH}). \quad (10)$$

График зависимости  $P(f|c)$  от  $V_{TH}$  для  $V_{ESD} = 2$  кВ показан на рис. 2.

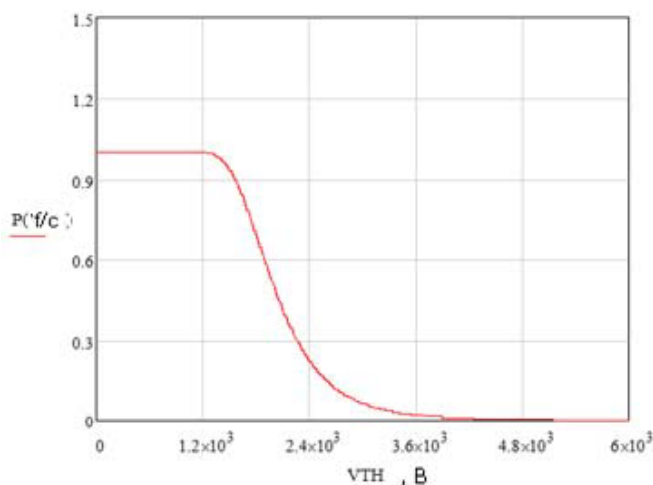


Рис. 2. Зависимость  $P(f|c)$  от  $V_{TH}$

Кроме того, в качестве статистики отказов КМОП ИС в [9] использованы результаты испытаний КМОП ИС, предусмотренные стандартом [10], метод 3015 (Human Body Model). Этот метод предполагает контактный тип разряда статического электричества, в то время как

на КМОП ИС может и воздействовать и воздушный ЭСР. Для учета типа разряда в [11] предложено ввести в модель (3) коэффициент  $K_{ESD}$ , учитывающий тип разряда:

$$\lambda_{EOS} = - \frac{\ln[1 - 0,00057 \cdot K_{ESD} \cdot \exp(-0,0002 \cdot V_{ESD})]}{0,00876} \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Значения коэффициента  $K_{ESD}$  для воздушного ЭСР, полученные в [11], приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения коэффициента  $K_{ESD}$

№ п/п	$V_{ESD}$ , В	$K_{ESD}$
1	2	3
1	2000	1,0
2	4000	1,0
3	8000	0,75
4	15000	0,53

На рис. 3 приведены графики зависимости  $\lambda_P$  СБИС типа IN80C49N от напряжения ЭСР ( $V_{ESD}$ ), рассчитанные в [11] по модели (11).

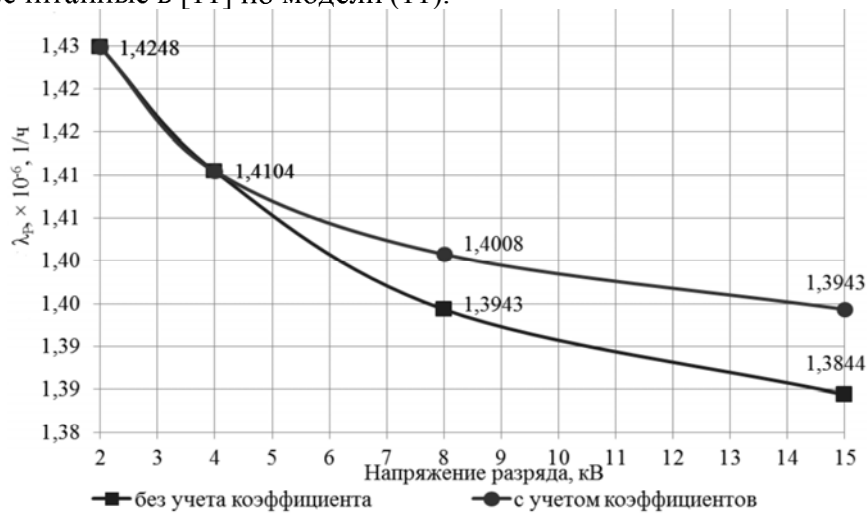


Рис. 2. Зависимости  $\lambda_P$  СБИС типа IN80C49N от  $V_{ESD}$

Используя приведенные выше модели для случая применения внешней защиты и известном типе разряда статического электричества, модель вероятности отказа КМОП СБИС -  $P(f)$  можно представить в виде:

$$P(f) = (1 - e^{-\Lambda_{ESD} \cdot t}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^{K_{ESD} \cdot V_{ESD}} e^{-\frac{\left[ \frac{v_{TH} - \frac{V_{TH}}{1-3 \cdot H}}{H \cdot \frac{V_{TH}}{1-3 \cdot H}} \right]^2}{2}} dv_{TH} \quad (12)$$

Тогда, в соответствии с методикой (4), интенсивность отказов КМОП ИС будет равна:

$$\lambda_{EOS} = - \frac{\ln[1 - P(f)]}{0,00876} \cdot 10^{-6}. \quad (13)$$

Таким образом, приведенные выше соотношения позволяют повысить точность расчётной оценки интенсивности отказов КМОП ИС в случае применения внешней защиты и известном типе разряда статического электричества. Однако следует иметь ввиду, что для оценки параметров распределения  $v_{TH}$  использовано допущение о постоянстве коэффициента вариации, что может вносить погрешность в расчеты  $\lambda_{EOS}$ .

#### Литература

1. ОСТ-4ГО.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности.
2. Справочник «Надежность ЭРИ» - М.: МО РФ, 2006.
3. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. - USA: DoD, 1991.
4. RADS-TR-89-177. VHSIC/VHSIC-LIKE reliability prediction modeling. - USA: RADS, 1989.
5. 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.
6. RIAC-HDBK-217Plus. Handbook of 217Plus™ reliability prediction models. - USA: RIAC, 2006.
7. Кечиев Л.Н., Пожидаев. Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. - М.: ИД «Технологии», 2005. - 352 с.
8. VZAP-1. Electrostatic discharge susceptibility of electronic device. - Reliability analysis center publication, 1983.
9. J. Giusti J. The probability of an ESD failure in unprotected equipment. / Electrical over-stress/Electrostatic discharge symposium proceedings, 1986.
10. MIL-STD 883D. Method 3015.7. Military Standard for Test Methods and Procedures Microelectronics: ESD Sensitivity Classification.
11. Пискун А.Е., Жаднов В.В. Моделирование интенсивности отказов интегральных схем бортовой космической аппаратуры из-за воздействия электростатических разрядов. / Технологии электромагнитной совместимости. - 2016. - № 1. - с. 49-54.

УДК 681.178

### **КОНТРОЛЬ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ WENZEL LH 65**

Курочкин И.А., Бревенникова Е.С.

В условиях современного производства требования к точности и производительности измерений непрерывно повышаются. Для полного контроля деталей применяются широко-универсальное, автоматическое, средство контроля – координатно-измерительные машины (КИМ). Использование КИМ позволяет оперативно измерять геометрические параметры простых и сложных прецизионных деталей, измерение которых затруднительно, обеспечивая повышение качества выпускаемой продукции. С их применением повышается точность и достоверность результатов измерения. Координатно – измерительная машина WENZEL LH 65 значительно упрощает метрологическую подготовку производства нового изделия, так как отпадает необходимость создания значительного количества средств специальной измерительной оснастки.