

Оценка надёжности электронных измерительных приборов при воздействиях электростатических разрядов

В. В. Жаднов,

кандидат технических наук,
профессор

Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”

В статье рассматриваются вопросы оценки надёжности электронных измерительных приборов при проектировании. Приводится описание моделей интенсивностей отказов КМОП ИС, учитывающих влияние ЭСР, и показано, что для электронных измерительных приборов, содержащих относительно небольшое количество таких микросхем, применение стандартизированной модели интенсивностей отказов, учитывающей влияние ЭСР, может привести к существенным погрешностям в расчётах надёжности. В качестве альтернативы предложена модель, основанная на использовании характеристик надёжности внешней защиты прибора от ЭСР.

Введение

В состав электронной компонентной базы электронных измерительных приборов последних поколений входят сверхбольшие и сверхбыстродействующие интегральные схемы (микропроцессоры, контроллеры, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи и др.), имеющие относительно невысокую стойкость к воздействию электростатических разрядов. Вместе с тем, эти приборы могут подвергаться воздействию электростатических разрядов, как со стороны человека-оператора, так и со стороны каналов связи с объектом измерений. Поэтому одной из задач, которые необходимо решать при оценке надёжности таких приборов, является расчёт характеристик надёжности микросхем с учётом воздействия электростатических разрядов.

Модель интенсивности отказов КМОП ИС

Расчёты надёжности электронных измерительных приборов (ЭИП) при проектировании проводятся по методикам стандарта [1], в котором для расчётов интенсивности отказов электронных модулей первого уровня

рекомендовано использование справочника [2]. Математическая модель интенсивности отказов КМОП ИС, приведенная в этом справочнике, имеет вид:

$$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{б}} \cdot K_{\text{с.т}} \cdot K_{\text{корп}} \cdot K_{\text{в}} \cdot K_{\text{ж}} \cdot K_{\text{пр}} \cdot \text{ч}^{-1}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{б}}$ — базовая интенсивность отказов; $K_{\text{с.т}}$ — коэффициент, учитывающий сложность ИС и температуру окружающей среды; $K_{\text{корп}}$ — коэффициент, учитывающий тип корпуса ИС; $K_{\text{в}}$ — коэффициент, учитывающий величину напряжения питания КМОП ИС; $K_{\text{ж}}$ — коэффициент, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации; $K_{\text{пр}}$ — коэффициент, учитывающий степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки.

Как следует из (1), в модели интенсивности отказов КМОП ИС не учитывается влияние воздействия электростатических разрядов (Electrostatic Discharge — ESD) на их надёжность. Поэтому при использовании модели (1) разработчик ЭИП должен либо применять КМОП ИС с высокой стойкостью к воздействию электростатических разрядов (ЭСР), либо обеспечить 100% защиту электронных модулей от воздействия ЭСР [3]. Очевидно, что этого на практике добиться невозможно,

Ключевые слова: электронный измерительный прибор, интегральная микросхема, электростатический разряд, надёжность, интенсивность отказов, методика расчёта.

Keywords: electronic measuring instrument, microcircuit, electrostatic discharge, reliability, failure rate, calculation method.

что обусловлено как разбросом порогового напряжения (Threshold Voltage — V_{TH}) КМОП ИС к воздействию ЭСР, так и ненадёжностью самих схем защиты. Это подтверждается и статистикой отказов КМОП ИС в ЭИП из-за воздействия ЭСР.

В отличие от справочника [2] в стандарте [4] приведена математическая модель интенсивности отказов КМОП СВИС, учитывающая воздействие ЭСР:

$$\lambda_P = (\lambda_{BD} \cdot \pi_{MGF} \cdot \pi_T \cdot \pi_{CD} + \lambda_{BP} \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_{PT}) \cdot 10^{-6} + \lambda_{ESD} \text{ ч}^{-1}, \quad (2)$$

где λ_{BD} — базовая интенсивность отказов кристалла; π_{MGF} — коэффициент, учитывающий степень освоения производства КМОП ИС; π_T — коэффициент, учитывающий влияние рабочей температуры; π_{CD} — коэффициент, учитывающий сложность КМОП ИС; λ_{BP} — базовая интенсивность отказов корпуса; π_E — коэффициент, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации; π_Q — коэффициент, учитывающий уровень качества КМОП ИС; π_{PT} — коэффициент, учитывающий тип корпуса КМОП ИС; λ_{ESD} — интенсивность отказов, обусловленная воздействием ЭСР.

Значение λ_{ESD} в (2) рассчитывается по формуле:

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

где $P(c) = 5,7 \cdot 10^{-4}$; $\Theta = 2 \cdot 10^{-4} \text{ В}^{-1}$ — постоянные коэффициенты; V_{TH} — пороговое напряжение КМОП ИС по ТУ, В.

График зависимости λ_{ESD} от V_{TH} показан на рис. 1.

Обоснование метода формирования модели (3) приведено в [5] и подробно рассмотрено в [6]. Следует отметить, что хотя численные значения коэффициентов $P(c)$ и Θ в модели (3) рассчитаны на основе статистики отказов КМОП ИС, полученной в 80-х годах прошлого века, эта модель без изменений вошла в справочник [7] и в программные средства расчётов надёжности [3], реализующие модели стандарта [4] и справочника [7].

Однако в [6] показано, что поскольку для расчёта коэффициентов модели (3) использовались усреднённые значения V_{TH} , то она позволяет получить адекватные результаты при расчёте надёжности ЭИП, которые содержат большое число разнотипных КМОП ИС (с защитой и без защиты от ЭСР) и функционируют в окружающей электрической среде, для которой трудно оценить вероятность возникновения контактов КМОП ИС с источниками ЭСР (Probability of Contact from an ESD Source) — $P(c)$.

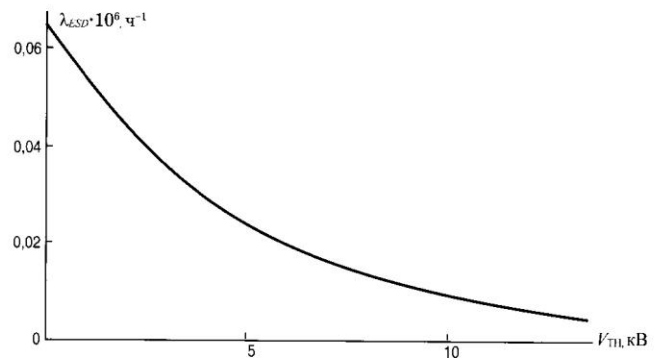


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов КМОП ИС, обусловленной воздействием ЭСР, от её порогового напряжения

Поэтому значения коэффициентов модели (3) следует уточнять, если имеется информация об окружающей электрической среде, как, например, для КМОП ИС, применяемых в бортовой контрольно-измерительной аппаратуре космических аппаратов (КА), которые эксплуатируются 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 [8]. Для этого случая в [6] на основе статистики геомагнитных бурь и суббурь было получено значение $P(c)$, которое составило $7,28 \cdot 10^{-3}$.

Использование характеристик внешней защиты в модели интенсивности отказов КМОП ИС

В [5] для оценки вероятности контакта КМОП ИС с источником ЭСР используется значение вероятности отказа КМОП ИС при контакте с источником ЭСР (Probability of Failure given Contact from an ESD Source) — $P(f|c)$, рассчитанное для полученного в [9] значения $V_{TH50} = 2,2 \text{ кВ}$ и равное 0,619. Однако это значение $P(f|c)$ достаточно велико. Поэтому очевидно, что в случае, если и значение $P(c)$ близко к 1, что характерно для ЭИП, с которыми постоянно контактирует оператор, то для снижения 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]:

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

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

$$\Lambda_{cs} = \sum_{i=1}^{I_{cs}} \lambda_{ЭИ} \text{ ч}^{-1}, \quad (6)$$

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

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

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

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

где $f(v_{TH})$ — плотность вероятности порогового напряжения КМОП ИС.

По результатам испытаний КМОП ИС на стойкость к ЭСР в [10] показано, что $f(v_{TH})$ можно аппроксимировать нормальным распределением:

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

где $m(v_{TH})$, $\sigma(v_{TH})$ — параметры распределения v_{TH} , В. Численные значения параметров распределения (8), полученные в [10] для двух видов исполнения КМОП ИС, приведены в табл. 1.

График плотности вероятности v_{TH} для КМОП ИС с защитой от ЭСР показан на рис. 2.

Очевидно, что при увеличении V_{TH} при фиксированном напряжении ЭСР (V_{ESD}) значение $P(f|c)$ будет уменьшаться. График зависимости $P(f|c)$ КМОП ИС от V_{TH} для $V_{ESD} = 2$ кВ показан на рис. 3.

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

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

$$\sigma(v_{TH}) = \nu \cdot m(v_{TH}). \quad (10)$$

Таблица 1.

Значения параметров распределения порогового напряжения КМОП ИС

№ п/п	Исполнение КМОП ИС	$m(v_{TH})$, кВ	$\sigma(v_{TH})$, кВ	ν
1	2	3	4	5
1	Без защиты от ЭСР	1,175	0,375	0,319
2	С защитой от ЭСР	8	1,75	0,219

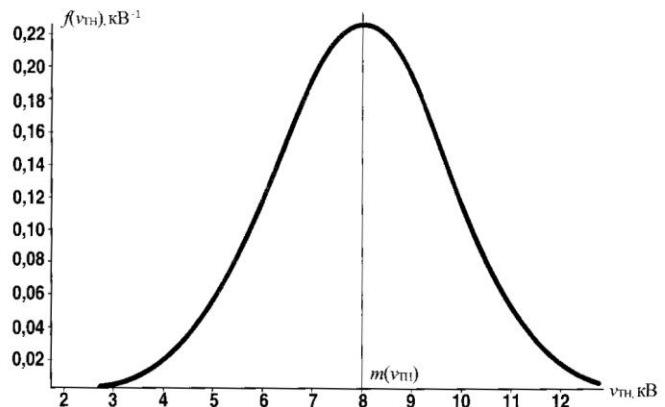


Рис. 2. Плотность вероятности порогового напряжения КМОП ИС с защитой от ЭСР

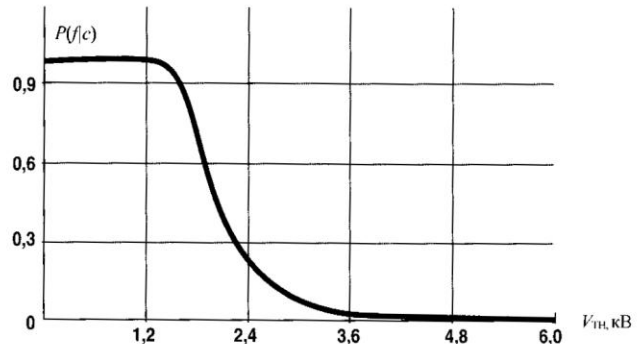


Рис. 3. Зависимость вероятности отказа КМОП ИС при контакте с источником ЭСР напряжением 2 кВ от её порогового напряжения

Кроме того, в качестве статистики отказов КМОП ИС в [10] использованы результаты испытаний микросхем, предусмотренные стандартом [11], метод 3015 (Human Body Model). Этот метод предполагает контактный тип разряда статического электричества, в то время как на ЭИП может воздействовать и воздушный ЭСР. Для учета типа разряда в [12] предложено ввести в модель (3) коэффициент K_{ESD} , учитывающий тип разряда:

$$K_{ESD} = \frac{V_{ESDк}}{V_{ESDв}}, \quad (11)$$

где $V_{ESDк}$ — напряжение контактного ЭСР; $V_{ESDв}$ — напряжение воздушного ЭСР.

Значения коэффициента K_{ESD} определяются на основе данных, приведённых в стандарте [13] и показанных на рис. 4.

Контактный разряд		Воздушный разряд	
Степень жесткости	Испытательное напряжение, кВ	Степень жесткости	Испытательное напряжение, кВ
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
-	Специальное	-	Специальное

- открытая степень жесткости испытаний. Испытательное напряжение должно быть указано в технической документации на ТС конкретного вида. Если установлено более высокое испытательное напряжение, чем указано для степеней жесткости, необходимо использовать специальное испытательное оборудование.

Рис. 4. ГОСТ 30804.4.2: степени жесткости испытаний на устойчивость к электростатическим разрядам

Исходя из принципа получения “верхней” оценки λ_{ESD} , зависимость K_{ESD} от V_{ESD} (или от V_{C3}) следует представить в табличном виде (см. табл. 2).

Таблица 2. Значения коэффициента, учитывающего тип разряда

№ п/п	V_{C3} , В	K_{ESD}	
		Контактный	Воздушный
1	2	3	4
1	0–1999	1,0	1,0
2	2000–3999	1,0	1,0
3	4000–7999	1,0	1,0
4	8000–14999	1,0	0,75
5	≥15000	1,0	0,53

Используя приведённые выше модели для случая применения внешней защиты и известного типа разряда статического электричества, модель вероятности отказа КМОП СВИС при воздействии ЭСР (Probability of Failure due to ESD) — $P(f)$ можно представить в виде:

$$P(f) = (1 - e^{-\Lambda_{cs} \cdot t}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^{K_{ESD} \cdot V_{C3}} e^{-\frac{v_{TH} (1-3v) - V_{TH}}{v \cdot V_{TH}}^2} dv_{TH} \quad (12)$$

Тогда в соответствии с методикой [5] модель интенсивности отказов КМОП ИС, обусловленная воздействием ЭСР, будет иметь вид:

$$\lambda_{ESD} = \frac{\ln \left\{ 1 - (1 - e^{-\Lambda_{cs} \cdot t}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^{K_{ESD} \cdot V_{C3}} e^{-\frac{v_{TH} (1-3v) - V_{TH}}{v \cdot V_{TH}}^2} dv_{TH} \right\}}{t} \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}, \quad (13)$$

где Λ_{cs} — интенсивность отказов схемы защиты, ч^{-1} ; t — время эксплуатации ЭИП, ч ; K_{ESD} — коэффициент,

учитывающий тип разряда; V_{C3} — напряжение ЭСР, на которое рассчитана внешняя защита, В; v — коэффициент вариации порогового напряжения КМОП ИС; V_{TH} — пороговое напряжение КМОП ИС по ТУ, В.

Заключение

Таким образом, приведённые в настоящей статье соотношения позволяют повысить точность расчётной оценки надёжности ЭИП, содержащих КМОП ИС, в случае применения внешней защиты и известном типе разряда статического электричества. Однако следует иметь в виду, что для оценки параметров распределения порогового напряжения по справочным данным использовано допущение о постоянстве коэффициента вариации, которое может вносить погрешность в расчёты интенсивности отказов, обусловленной воздействием ЭСР. Поэтому для обеспечения достоверности расчетов необходимо уточнять значения коэффициентов вариации для каждого семейства КМОП ИС или, по крайней мере, для КМОП ИС одного топологического размера.

Литература

- ОСТ 4ГО.012.242–84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчёта показателей надёжности.
- Справочник “Надёжность ЭРИ” — М.: МО РФ, 2006. — 641 с.
- Жаднов В. В. Расчёт надёжности электронных модулей: научное издание. М.: Солон-Пресс, 2016. — 232 с. (Серия “Библиотека студента”).
- MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. — USA: DoD, 1991. — 205 p.
- RADS-TR-89-177. VHSIC/VHSIC-LIKE Reliability Prediction Modeling. — USA: RADS, 1989. — 311 p.
- Абрамепин 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.
- RIAC-HDBK-217Plus. Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models. — USA: RIAC, 2006. — 170 p.
- Кечиев Л. Н., Пожидаев Е. Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. — М.: ИД “Технологии”, 2005. — 352 с.
- VZAP-1. Electrostatic Discharge Susceptibility of Electronic Device. — Reliability Analysis Center Publication, 1983.
- J. Giusti J. The Probability of an ESD Failure in Unprotected Equipment. / Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 1986.
- MIL-STD 883D. Method 3015.7. Military Standard for Test Methods and Procedures Microelectronics: ESD Sensitivity Classification.
- Пискун Г. А., Алексеев В. Ф. Совершенствование математической модели расчёта надёжности КМОП СВИС с учётом особенностей воздействия электростатического разряда. / Технологии электромагнитной совместимости. — 2016. — № 1. — с. 49–54.
- ГОСТ 30804.4.2–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.