

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

В.В. Жаднов

О «совершенствовании» математической модели расчета надежности КМОП СБИС с учетом ЭСР

Рассмотрена модель интенсивности отказов КМОП СБИС, предложенная в статье Пискуна Г.А., Алексеева В.Ф. «Совершенствование математической модели расчёта надёжности КМОП СБИС с учётом особенностей воздействия электростатического разряда», опубликованной в первом номере журнала «Технологии электромагнитной совместимости» за 2016 год. Показано, что утверждение авторов о том, что эта модель «...позволит более точно осуществлять оценку надёжности КМОП СБИС» в корне не верно, и её применение неизбежно приведёт к неадекватным результатам. В качестве альтернативы предложена модель интенсивности отказов КМОП СБИС, также позволяющая учитывать вид ЭСР, но основанная на использовании характеристик стойкости КМОП СБИС к воздействию ЭСР.

Ключевые слова: электростатический разряд, КМОП СБИС, надёжность, интенсивность отказов, математическая модель

Одним из аспектов повышения точности расчётов надёжности аппаратуры является совершенствование математических моделей характеристик надёжности электронной компонентной базы. В настоящее время общепринятыми характеристиками безотказности электронных компонентов являются их интенсивности отказов. В отечественных и зарубежных справочниках по надёжности приведены математические модели интенсивностей отказов, учитывающие режимы и условия применения, конструктивно-технологические особенности и др. факторы, влияющие на надёжность электронных компонентов. Очевидно, что постоянное развитие как аппаратуры, так и электронных компонентов обуславливает необходимость совершенствования моделей интенсивностей отказов и публикации на эту тему вызывают несомненный интерес как у специалистов в области надёжности, так и у разработчиков аппаратуры. Поэтому любые «совершенствования» моделей должны опираться на методики их формирования и подтверждаться адекватностью полученных с их помощью результатов моделирования.

В статье [1] предложено совершенствование модели интенсивностей отказов КМОП СБИС при воздействии электростатических разрядов (ЭСР), приведённой в стандарте [2]:

$$\lambda_{EOS} = - \frac{\ln(1 - 0,00057 \cdot e^{-0,0002 \cdot V_{TH}})}{8,76 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}, \quad (1)$$

где λ_{EOS} – интенсивность отказов КМОП СБИС при воздействии ЭСР; V_{TH} – пороговое напряжение КМОП СБИС по ТУ, В.

Суть предложенными авторами [1] совершенствования модели (1) заключается в введении в неё коэффициента (K_{ESD}), учитывающего тип ЭСР, воздействующего на КМОП СБИС. Значение коэффициента K_{ESD} предлагается определять на основе данных, приведённых в стандарте [3] и показанных на рис. 1.

Предложенная в [1] формула для расчёта коэффициента K_{ESD} имеет вид:

$$K_{ESD} = \frac{U_{TH(contact)}}{U_{TH(air)}}, \quad (2)$$

где $V_{ESD(contact)}$ – напряжение контактного ЭСР; $V_{ESD(air)}$ – напряжение воздушного ЭСР.

Полученные в [1] значения коэффициента K_{ESD} приведены в табл. 1.

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. 1. ГОСТ 30804.4.2: Степени жесткости испытаний на устойчивость к электростатическим разрядам

Таблица 1

Значения поправочного коэффициента K_{ESD} с учетом типа разряда статического электричества и величины его напряжения

Степень жесткости испытаний	Контактный ЭСР		Воздушный ЭСР	
	Значение напряжения $U_{TH(contact)}, В$	Значение коэффициента K_{ESD}	Значение напряжения $U_{TH(air)}, В$	Значение коэффициента K_{ESD}
1	2000	1	2000	1
2	4000	1	4000	1
3	6000	1	8000	0,75
4	8000	1	15000	0,53

С учетом этого коэффициента усовершенствованная модель λ_{EOS} принимает вид:

$$\lambda_{EOS} = - \frac{\ln(1 - 0,00057 \cdot e^{-0,0002 \cdot K_{ESD} \cdot U_{TH}})}{0,00876} \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}, \quad (3)$$

где U_{TH} - напряжение разряда статического электричества, В.

Сравнивая (1) и (3) не трудно заметить, что в модель (3) авторы не только ввели коэффициент K_{ESD} , но и заменили пороговое напряжение КМОП СБИС, характеризующее её стойкость к воздействию ЭСР (V_{TH}) на напряжение разряда статического электричества (U_{TH}). Однако правильной было бы это напряжение обозначать U_{ESD} (*Electrostatic Discharge – ESD*), т.к. в [4] обозначение V_{TH} расшифровано как *Failure Threshold Voltage* (пороговое напряжение отказа).

Казалось бы, в этой путанице обозначений нет ничего особенного, т.к. из табл. 1 следует, что испытательное напряжение и определяет пороговое напряжение КМОП СБИС. Однако далее авторы приводят график зависимости интенсивности отказов от напряжения разряда (см. рис. 2).

Сравнивая данные, приведённые на рис. 1 и график, приведённый на рис. 2 можно сделать вывод о том, что в модели (3) под U_{TH} подразумевается не пороговое напряжение (или испытательное напряжение) КМОП СБИС, а именно напряжение ЭСР, действующее на КМОП СБИС в аппаратуре (U_{ESD}). Вместе с тем в [4] отмечается, что при разработке модели (1) количественная оценка величины уровня ЭСР, действующего на КМОП СБИС в зависимости от характеристик окружающей электрической среды, является сложной задачей и в [4] такая задача не рассматривалась, а при разработке модели λ_{EOS} была получена только её зависимость от порогового напряжения [5].

Таким образом, даже если и известно напряжение ЭСР, действующее на КМОП СБИС в аппаратуре, то в модель (1) этот параметр не входит. Кроме того, даже если допустить возможность замены в модели (1) V_{TH} на U_{ESD} , то модель (1) будет противоречить здравому смыслу, т.к. для каждой КМОП СБИС V_{TH} является постоянной величиной, нормируемой в ТУ, а из графика, приведённого на рис. 2, следует, что с ростом U_{ESD} значение λ_{EOS} будет снижаться, а, следовательно, и вероятность её отказа вне зависимости от уровня стойкости КМОП СБИС к воздействию ЭСР!

Исходя из вышеизложенного, можно предложить использование коэффициента K_{ESD} , но уже в качестве поправки к V_{TH} . Это будет целесообразно в том случае, если доказано, что на КМОП СБИС в аппаратуре действует только воздушный ЭСР. Возможность использования коэффициента K_{ESD} в качестве поправки к V_{TH} обусловлена тем, что испытания микросхем на стойкость к ЭСР обычно проводятся в соответствии со стандартом [6], метод 3015 (*Human Body Model*), который предполагает контактный тип разряда статического электричества, и, следовательно, в ТУ приводятся значения V_{TH} для контактного ЭСР (см, например, [7]).

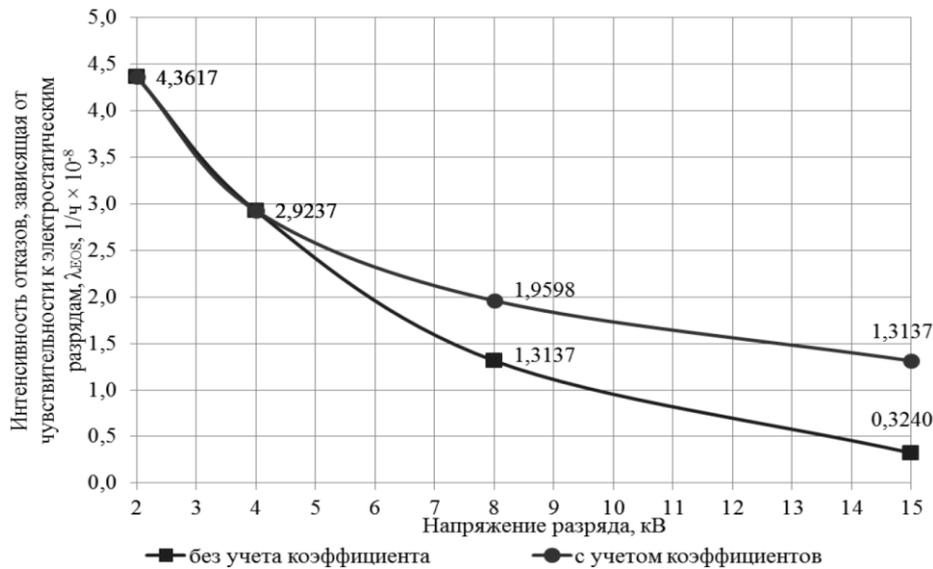


Рис. 2. График зависимости интенсивности отказов от напряжения разряда

Однако и в этом случае модель (3) даст ошибку, т.к. из графика (см. рис. 2) видно, что при одном и том же значении V_{TH} значение λ_{EOS} при воздушном разряде больше, чем при контактном!

Для того, чтобы избежать этого противоречия модель (3) должна быть представлена в виде:

$$\lambda_{EOS} = - \frac{\ln \left(1 - 0,00057 \cdot e^{-0,0002 \frac{V_{TH}}{K_{ESD}}} \right)}{0,00876} \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}, \quad (4)$$

где V_{TH} – пороговое напряжение КМОП СБИС по ТУ, В; K_{ESD} – коэффициент, учитывающий тип разряда.

И, наконец, последнее замечание. Из графика (см. рис. 2) следует, что авторы использовали аппроксимацию зависимости K_{ESD} от V_{TH} некоторой функцией, в то время как в исходной таблице приведены лишь её дискретные значения (см. рис. 1). Поэтому, исходя из принципа получения «верхней» оценки λ_{EOS} , зависимость K_{ESD} от V_{TH} следует представить также в табличном виде (см. табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициента, учитывающего тип разряда

№ п/п	V_{TH} , 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

Другими словами, при использовании данных табл. 2 эквивалентная стойкость КМОП СБИС при воздействии воздушного ЭСР в диапазоне от 0 до 7999 В будет равна стойкости КМОП СБИС

по ТУ (V_{TH} для контактного ЭСР), в диапазоне от 8000 до 14999 В будет в 1,3 раза выше заданной в ТУ, а в диапазоне от 15000 В и более – в 1,9 раза выше.

В заключении следует отметить, что хотя модель (4) и лишена погрешностей модели (3), но и её область применения ограничена случаем, когда на КМПОП СБИС в аппаратуре действует только воздушный ЭСР. Вместе с тем, введение в модель λ_{EOS} зависимости от U_{ESD} является актуальной задачей, т.к. предельные значения U_{ESD} нормируются в ТЗ на аппаратуру и исходя из этих требований осуществляется и выбор КМПОП СБИС и/или введение в аппаратуру схем внешней защиты КМПОП СБИС от ЭСР.

Список литературы

1. Пискун Г.А., Алексеев В.Ф. Совершенствование математической модели расчёта надёжности КМОП СБИС с учётом особенностей воздействия электростатического разряда. / Технологии электромагнитной совместимости. – 2016. – № 1. – с. 49–54.
2. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. – USA: DoD, 1991. – 205 p.
3. ГОСТ 30804.4.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.
4. RADS-TR-89-177. VHSIC/VHSIC-LIKE Reliability Prediction Modeling. – USA: RADS, 1989. – 311 p.
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. MIL-STD 883D. Method 3015.7. Military Standard for Test Methods and Procedures Microelectronics: ESD Sensitivity Classification.
7. UG116 (v 10.4). Device Reliability Report: Second Half 2015. – XILINX, 2016. – 110 p.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Статья поступила 10.10.2016

Zhadnov V.V.

About «improving» a mathematical model for calculation of the reliability of CMOS VHSIC of ESD

The considered model of the failure rate of CMOS VHSIC design proposed in the article Piskun G.A., Alekseev V.F., "Improvement of mathematical models calculating of CMOS VLSIC taking into account features of impact of electrostatic discharge", published in the first issue of the journal "Technologies of electromagnetic compatibility" for the year 2016. It is shown that the authors claim that this model "...will more accurately assess the reliability of CMOS VHSIC design" is fundamentally flawed and its application will inevitably lead to inadequate results. Alternatively, the proposed model of the failure rate of CMOS VHSIC design, which also allows to take into account the views of ESD, but based on the use of resistance characteristics of CMOS VHSIC to the effects of ESD.

Key words: electrostatic discharge, CMOS VHSIC, reliability, failure rate, mathematical model

National research University «Higher school of Economics»