

УДК 621.396, 621.8.019.8

В.В. Жаднов

Влияние электростатических разрядов на показатели ремонтпригодности электронных средств

Показатели ремонтпригодности современных электронных средств в значительной степени зависят от характеристик надежности применяемой электронной компонентной базы. Воздействие катастрофических электрических перегрузок вследствие электростатических разрядов может привести к отказам интегральных схем, которые широко используются в электронных средствах. В статье рассматриваются вопросы оценки влияния электростатических разрядов на показатели ремонтпригодности электронных средств.

Ключевые слова: электронное средство, ремонтпригодность, электростатический разряд, интегральная схема, интенсивность отказов

Введение

Значительная часть современных электронных средств (ЭС) по классификации ГОСТ 27.003 [1] относятся к восстанавливаемым изделиям, для которых нормируются показатели ремонтпригодности. Очевидно, что чем лучше значения этих показателей, тем выше эффективность функционирования ЭС. На этапе технического проектирования подтверждение показателей ремонтпригодности ЭС проводится расчетным путем, по методике, которая приведена в ОСТ 4.012.012 [2].

На этапе разработки рабочей документации опытного образца ЭС методика также может применяться в случае, если невозможно (или нецелесообразно) проведение испытаний по определению его показателей ремонтпригодности.

Методика предназначена для расчета среднего времени восстановления ЭС, которые представляет собой изделия вида I по ГОСТ 27.003 [1]. Методика так же может применяться для изделий вида II, которые могут быть отнесенные к изделиям вида I путем введения понятия отказа. В методике принято, что контроль работоспособности ЭС, а также отыскание отказавшей составной части (СЧ) или ее сменного элемента (СЭ) проводится с помощью автоматических или автоматизированных систем контроля (АСК). В методике принято, что если контроль работоспособности ЭС возможен без нарушения ее функционирования, то он осуществляется непрерывно.

Расчет среднего времени восстановления ЭС проводится в два этапа:

I этап: Расчет среднего времени восстановления СЧ;

II этап: Расчет среднего времени восстановления ЭС в целом.

Рассмотрим каждый из этих этапов.

Методика расчета среднего времени восстановления

В общем случае среднее время восстановления СЧ ($t_{\bar{v}}$) определяются по формуле:

$$t_{\bar{v}} = t_{об} + t_{ом} + t_{у}, \quad (1)$$

где: $t_{об}$ – среднее время обнаружения отказа СЧ; $t_{ом}$ – среднее время отыскания отказавшего СЭ; $t_{у}$ – среднее время устранения отказа СЧ.

В частном случае, когда устранение отказа СЧ проводится путем ее замены из состава ЗИП, среднее время восстановления СЧ определяется по формуле:

$$t_{\bar{v}} = t_{об} + t_{з},$$

где: $t_{з}$ – среднее время замены СЧ из состава ЗИП.

Слагаемое $t_{об}$ в формуле (1) определяется на основе параметров работоспособности СЧ, под которыми понимаются выходные параметры СЧ, определяющие их работоспособность, по формуле:

$$t_{об} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{об_i} \cdot n_i)}{\sum_{i=1}^N n_i}, \quad (2)$$

где $t_{об_i}$ – среднее время обнаружения отклонения за пределы допусков параметров работоспособности СЧ через отклонение за пределы допусков параметров работоспособности ЭС; n_i – количество параметров работоспособности СЧ, среднее время обнаружения отклонения которых за пределы допусков равно $t_{об_i}$; N – количество различных значений среднего времени обнаружения отклонения за пределы допусков параметров работоспособности СЧ.

Из (2) следует, что среднее время обнаружения отклонения за пределы допуска параметра работоспособности СЧ равно среднему времени обнаружения отклонения за пределы допуска параметра работоспособности ЭС, на который влияет рассматриваемый параметр работоспособности СЧ:

$$t_{об_{СЧ}} = t_{об_{ЭС}}.$$

Если параметр работоспособности СЧ влияет на несколько параметров работоспособности РЭА с различными значениями среднего времени обнаружения, то:

$$t_{об_{СЧ}} = \min_{i=1, J} (t_{об1_{ЭС}}, t_{об2_{ЭС}}, \dots, t_{обI_{ЭС}}).$$

Среднее время обнаружения отклонения параметров работоспособности за пределы допуска определяется в зависимости от условий:

- если отклонение параметра за пределы допуска проявляется для обслуживающего персонала сразу через рабочие индикаторы ЭС или по другим каким-либо прямым или косвенным признакам, то:

$$t_{об} = 0;$$

- если отклонение параметра не является очевидным, а обнаруживается в результате контроля работоспособности ЭС (или СЧ), осуществляемого с периодом регулярного контроля (T_k), то:

$$t_{об} = \frac{T_k}{2},$$

при этом если контроль работоспособности ЭС (или СЧ) невозможен без нарушения ее функционирования, то значение T_k вычисляется из условия получения максимального коэффициента технического использования контролируемой ЭС (СЧ):

$$T_k = \sqrt{2 \cdot T_0 \cdot \tau},$$

где: T_0 – наработка на отказ контролируемой ЭС (СЧ); τ – продолжительность контроля параметров работоспособности ЭС (СЧ);

- если отклонение параметра не является очевидным, а обнаруживается в результате контроля работоспособности ЭС (или СЧ), осуществляемого через случайные, распределенные по экспоненциальному закону, промежутки времени со средним периодом контроля (T_k), то:

$$t_{об} = T_k.$$

Слагаемое $t_{ом}$ в формуле (1) определяется по формуле:

$$t_{ом} = t_n + \frac{\sum_{i=1}^K [\Lambda_{эpi} \cdot (t_{нодеi} + t_{проi})]}{\sum_{i=1}^K \Lambda_{эpi}}, \quad (3)$$

где: t_n – время подготовки СЧ к отысканию отказавшего СЭ; K – количество групп СЭ в СЧ; $\Lambda_{эpi}$ – суммарная интенсивность отказов i -й группы СЭ; $t_{нодеi}$ – общее время подготовки средств проверки, применяемых при отыскании отказавшего СЭ i -й группы; $t_{проi}$ – время проверки

параметров при отыскании отказавшего СЭ i -й группы.

Значение $t_{проv_i}$ в формуле (3) определяется по формуле:

$$t_{проv_i} = \sum_{s=1}^{S_i} \sum_{p=1}^{P_i} m_{s,p} \cdot t_{проv_{s,p}},$$

где: S_i – количество средств проверки, применяемых при отыскании отказавшей СЧ из i -й группы; P_i – количество вариантов конструктивного выполнения СЭ, проверяемых при отыскании отказавшего СЭ из i -й группы; $m_{s,p}$ – количество параметров, проверяемых s -м средством проверки при p -м варианте конструктивного выполнения СЭ при отыскании отказавшего СЭ из i -й группы; $t_{проv_{s,p}}$ – время проверки одного параметра s -м средством проверки при p -м варианте конструктивного выполнения СЭ.

Слагаемое t_y в формуле (1) определяется по формуле:

$$t_y = \frac{\sum_{i=1}^K (\Lambda_{эp_i} \cdot t_{устp_i})}{\sum_{i=1}^K \Lambda_{эp_i}}, \quad (4)$$

где: $t_{устp_i}$ – время, затрачиваемое на проведение операций по устранению отказа СЭ.

На втором этапе определяется среднее время восстановления ЭС (T_a) по формуле:

$$T_a = \frac{\sum_{i=1}^L (t_{a_i} \cdot \Lambda_i)}{\sum_{i=1}^L \Lambda_i}, \quad (5)$$

где: t_{a_i} – среднее время восстановления i -й СЧ; Λ_i – интенсивность отказов i -й СЧ; L – количество СЧ в ЭС.

Оценка влияния электростатических разрядов на среднее время восстановления

Как следует из (1), (2) и (3) среднее время восстановления ЭС зависит от интенсивностей отказов ее СЧ и СЭ.

Интенсивности отказов СЧ рассчитываются по методике, приведенной в ОСТ 4Г0.012.242 [3]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^I \lambda_{эi}, \quad (6)$$

где: $\lambda_{эi}$ – интенсивность отказов i -го ЭРИ в режиме работы; I – общее число ЭРИ в СЧ.

$$\lambda_{эi} = \lambda_э \cdot \prod_{j=1}^J K_j,$$

где: $\lambda_э$ – базовая интенсивность отказов ЭРИ; K_j – j -й коэффициент математической модели интенсивностей отказов ЭРИ; J – общее число коэффициентов в математической модели.

Математические модели интенсивностей отказов ЭРИ (формулы) и численные значения их коэффициентов приведены в справочнике [4]. Однако, ни в одной из приведенных в справочнике [4] моделей интенсивностей отказов ЭРИ влияние электростатических разрядов (ЭСР) не учитывается. Вместе с тем, в [5] показано, ЭСР оказывает значительное влияние на работоспособность ЭС. Это также нашло свое отражение в стандарте MIL-HDBK-217F [6], в котором приведена следующая модель для интенсивности отказов КМОП ИС:

$$\lambda_{э} = \lambda_D + \lambda_P + \lambda_{EOS} \quad (7)$$

где: λ_D – интенсивность отказов кристалла; λ_P – интенсивность отказов корпуса; λ_{EOS} – интенсивность отказов, обусловленная воздействием ЭСР.

Значение λ_{EOS} рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{EOS} \cdot 10^6 = \frac{-\ln(1 - 0,00057 \cdot e^{-0,0002 \cdot V_{TH}})}{0,00876}, \quad (8)$$

где V_{TH} – пороговое напряжение.

На рис. 1 приведен график зависимости λ_{EOS} от V_{TH} .

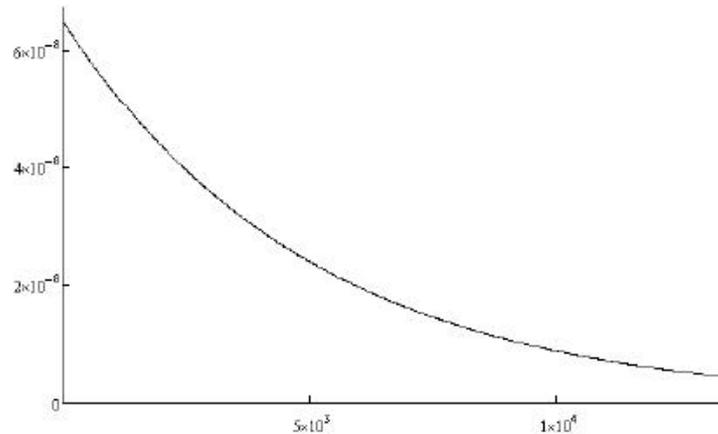


Рис. 1. График зависимости λ_{EOS} от V_{TH}

Тогда, используя модель (7), формулу (6) можно преобразовать к виду:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{I_{ЭРИ}} \lambda_{Э_i} + \sum_{j=1}^{J_{ИС}} \lambda_{Э_j}, \quad (9)$$

где: $\lambda_{Э_i}$ – интенсивность отказов i -го ЭРИ в режиме работы; $I_{ЭРИ}$ – общее число ЭРИ, за исключением КМОП ИС в СЧ; $\lambda_{Э_j}$ – интенсивность отказов j -ой ИС в режиме работы; $J_{ИС}$ – общее число КМОП ИС в СЧ;

Значение V_{TH} определяется в формуле (17) по результатам испытаний ИС на стойкость к воздействию ЭСР [7]. Хотя существует много видов испытаний 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 другие, наилучшим источником информации о чувствительности ИС (и в большинстве случаев единственным источником) являются испытания, предусмотренные в MIL-STD-883 [8], метод 3015 – Human Body Model.

Схема проверки ИС на стойкость к ЭСР по методу 3015.7 приведена на рис. 2.

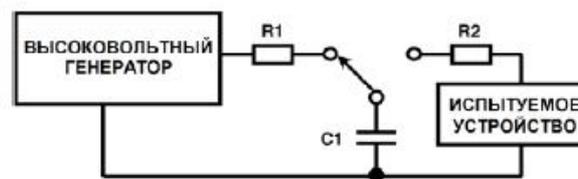


Рис. 2. Схема проверки ИС на стойкость к воздействию ЭСР

Типовые параметры схемы модели тела человека: $V_{SS} = 2000$ В, $C_1 = 100$ пФ (емкость тела человека), $R_2 = 1500$ Ом (сопротивление кожи человека).

При этих параметрах длительность экспоненциально затухающего участка импульса тока равна:

$$\tau = R_2 \cdot C_1 = 150 \text{ нс.}$$

Время нарастания входного импульса тока ЭСР t_{RL} должно быть меньше, чем 10 нс (см. рис. 3).

Согласно методу 3015.7, все выводы ИС (выводы «Вход/Выход» (I/O), «Земля» (GND) и «Питание» (VDD)) подвергаются воздействию трех импульсов V_{SS} положительной и отрицательной полярности с интервалом 1 с.

После испытаний на стойкость к ЭСР проводят замер токов утечек на всех выводах ИС. Если установлено, что ток утечки на каком-либо выводе превышает допустимую величину, то это рассматривается как отказ ИС.

Так, на рис. 4 приведены результаты испытаний ИС на стойкость к воздействию ЭСР компании XILINX [9].

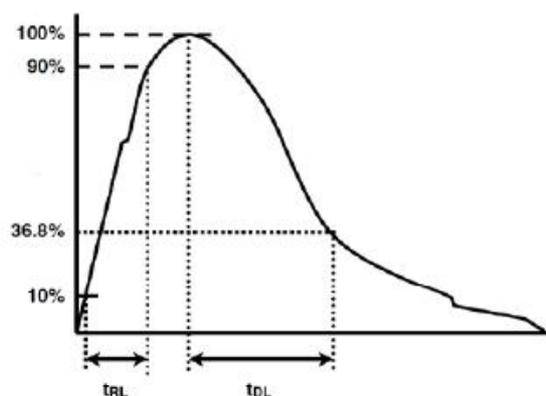


Рис. 3. Форма импульса разрядного тока (I_{PEAK}) при испытаниях ИС на стойкость к ЭСР по методу 3015.7

Table 1-8: Product ESD and Latch-up Data (Cont'd)

| Device | Latch-up | Human Body Model | Charge Device Model |
|-----------|----------|---------------------------------|------------------------|
| XC2Sxxx | +210 mA | +2,000V | +500V ⁽⁵⁾ |
| XC95xxxXL | +200 mA | +2,000V to +3,000V | +1,000V ⁽⁶⁾ |
| XCRxxxL | +200 mA | +2,000V to +3,000V | +500V ⁽⁷⁾ |
| XC2Vxxx | +200 mA | +750V to 2,000V ⁽¹²⁾ | +500V |
| XC2Cxxx | +200 mA | +2,000V | +500V |
| XC3Sxxx | +200 mA | +2,000V | +500V |
| XC3SxxxE | +200 mA | +2,000V | +500V |
| XC3SxxxA | +200 mA | +2,000V | +500V |

Рис. 4. Результаты испытаний ИС на стойкость к воздействию ЭСР

Как видно из рис. 4 метод 3015.7 позволяет подтвердить лишь то, что $V_{TH} > 2000$ В для всех типов ИС. Тогда можно принять, что $V_{TH} = \text{const}$ и, следовательно, $\lambda_{EOS} = \text{const}$, и преобразовать формулу (9) к виду:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{I_{ЭРИ}} \lambda_{\alpha_i} + J_{ИС} \cdot \lambda_{EOS} + \sum_{j=1}^{J_{ИС}} (\lambda_{D_j} + \lambda_{P_j}). \quad (10)$$

Подставим значение $V_{TH} = 2000$ В в формулу (8) найдем:

$$\lambda_{EOS} = \frac{-\ln(1 - 0,00057 \cdot e^{-0,0002 \cdot 2000})}{0,00876} = 4,36 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}.$$

С учетом этого формула (10) примет вид:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{I_{ЭРИ}} \lambda_{\alpha_i} + 4,36 \cdot 10^{-8} + \sum_{j=1}^{J_{ИС}} (\lambda_{D_j} + \lambda_{P_j}). \quad (11)$$

Подставив (11) в формулу (5) при условии, что СЧ представляет собой ЭРИ получим:

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^{I_{ЭРИ}} (t_{B_i} \cdot \lambda_{\alpha_i}) + 4,36 \cdot 10^{-8} \cdot \sum_{j=1}^{J_{ИС}} t_{B_j} + \sum_{j=1}^{J_{ИС}} [t_{B_j} \cdot (\lambda_{D_j} + \lambda_{P_j})]}{\sum_{i=1}^{I_{ЭРИ}} \lambda_{\alpha_i} + 4,36 \cdot 10^{-8} \cdot J_{ИС} + \sum_{j=1}^{J_{ИС}} (\lambda_{D_j} + \lambda_{P_j})}. \quad (12)$$

Таким образом, как следует из (12), при оценке показателей ремонтопригодности современных ЭС, в состав которых входят КМОП ИС следует учитывать влияние ЭСР.

Заключение

Приведенные выше соотношения позволяют сделать вывод о том, что воздействие электростатических разрядов необходимо учитывать при расчетных оценках среднего времени восстановления электронных средств, причем влияние электростатических разрядов на показатели ремонтпригодности электронных средств тем больше, чем больше содержится КМОП ИС в составе рассматриваемого электронного средства.

Список литературы

1. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
2. ОСТ 4.012.012-83. Аппаратура радиоэлектронная. Расчет среднего времени восстановления.
3. ОСТ 4 Г0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности.
4. Надежность ЭРИ: Справочник. – М.: МО РФ, 2006. – 641 с.
5. Кечиев Л.Н., Пожидаев. Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. – М.: ИД «Технологии», 2005. – 352 с.
6. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. – USA: DoD, 1991. – 204 p.
7. 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.
8. MIL-STD-883E. Test Method Standard Microcircuits. – USA: DoD, 1996. – 157 p.
9. UG116(v 10.3.1). Device Reliability Report: First Half 2015. – XILINX, 2015. – 101 p.

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

*Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики
Статья получена 01.09.2015*

Zhadnov V.V.

Effect of electrostatic discharge on the performance of the maintainability of the electronic means

Indicators of maintainability of modern electronic devices greatly depend on the characteristics of reliability of electronic components. The impact of catastrophic electrical overstress due to electrostatic discharge can lead to failures of integrated circuits, which are widely used in electronic tools. The article considers the issues of assessing the impact of electrostatic discharges on the performance of maintainability of electronic means.

Key word: electronic means, maintainability, electrostatic discharge, microcircuits, failure rate

National Research University Higher School of Economics