

УДК 621.396, 621.8.019.8

А.Е. Абрамешин, В.В. Жаднов, И.В. Жаднов**Расчетная оценка надежности электронных модулей аппаратуры космических аппаратов**

Надежность радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на космических аппаратах, в значительной степени определяет и надежность КА в целом. Если принять во внимание, что требования к космическим аппаратам (КА) постоянно ужесточаются (так, например, срок активного существования современных КА достигает 25 лет), то становится очевидной необходимость оценки надежности на самых ранних этапах проектирования, на которых закладывается та надежность, которую можно реализовать при изготовлении и поддерживать при эксплуатации аппаратуры КА. В статье рассматриваются особенности расчета надежности аппаратуры КА, в состав которой входят «сверхбольшие» и «сверхбыстродействующие» интегральные схемы последних поколений.

космический аппарат, радиоэлектронная аппаратура, КМОП СБИС, надежность

Основу аппаратуры современных космических аппаратов (КА) составляют электронные модули 1-го уровня (ЭМ1), которые в значительной степени определяют надежность аппаратуры и КА в целом. В инженерной практике для расчета надежности ЭМ1 используются методики, приведенные в ОСТ 4Г 0.012.242 [1]. В соответствии с этим стандартом интенсивность отказов ЭМ1 рассчитывается по формуле:

$$\Lambda_{ЭМ1} = \sum_{i=1}^I \lambda_{Эi}, \quad (1)$$

где: $\Lambda_{ЭМ1}$ – интенсивность отказов ЭМ1; $\lambda_{Эi}$ – интенсивность отказов i -того ЭРИ; I – общее количество ЭРИ в ЭМ1.

Кроме того, в справочнике [2] для расчета аппаратуры космического базирования приведена уточненная модель для $\Lambda_{ЭМ1}$:

$$\Lambda = K_a \cdot \Lambda_{ЭМ1}, \quad (2)$$

где: K_a – коэффициент, который учитывает среднестатистическую разницу в интенсивности отказов ЭРИ в аппаратуре, разрабатываемой и изготовляемой по требованиям различной НД.

Например, для аппаратуры, разрабатываемой и изготовляемой по положению РК – $K_a = 0,2$.

На первый взгляд, никаких проблем с расчетом $\lambda_{Эi}$ и, тем более Λ , возникать не должно, поскольку в справочнике [2] приведены математические модели эксплуатационной интенсивности отказов для различных классов ЭРИ вида:

$$\lambda_{Э} = K_{НИ} \cdot \lambda_б \cdot \prod_{j=1}^J K_j, \quad (3)$$

где: $K_{НИ}$ – коэффициент влияния ионизирующих излучений; $\lambda_б$ – базовая интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ, рассчитанная по результатам испытаний ЭРИ на безотказность, долговечность, ресурс; K_j – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; J – число учитываемых факторов.

Это действительно так при условии, что в ЭМ1 не используются «сверхбольшие» интегральные микросхемы (ИС), степень интеграции которых превышает ограничения, накладываемые на математические модели эксплуатационной интенсивности отказов, приведенные в справочнике [2].

Так, для всех групп ИС математическая модель имеет вид:

$$\lambda_{Э} = \lambda_б \cdot K_{СТ} \cdot K_{Корн} \cdot K_V \cdot K_{Э} \cdot K_{Пр}, \quad (4)$$

где: λ_6 – базовая интенсивность отказов ИС; $K_{C.T.}$ – коэффициент режима, зависящий от сложности ИС и температуры окружающей среды; $K_{Корп}$ – коэффициент, зависящий от типа корпуса ИС; K_V – коэффициент, зависящий от максимальных значений напряжения питания; K_3 – коэффициент эксплуатации, зависящий от жесткости условий эксплуатации. $K_{Пр}$ – коэффициент приемки, зависящий от уровня качества ИС.

В (4) значение $K_{C.T.}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{C.T.} = A \cdot e^{B(t+273)}, \quad (5)$$

где: A и B – коэффициенты модели; t – температура окружающей среды, °С.

Один из коэффициентов модели (5), а именно A , имеет ограничение по сложности ИС, которое заключается в том, что начиная с некоторого уровня сложности (наивысшего по классификации справочника [2]) значение A от его повышения уже не зависит, т.е., значение $K_{C.T.}$ зависит только от температуры окружающей среды.

Впрочем, это не столь существенно, т.к. ИС такой степени интеграции в России не производятся, поэтому для расчета ИС иностранного производства (ИП) используются модели эксплуатационной интенсивности отказов, приведенные в справочнике [3]:

$$\lambda_3 = (\lambda_{кр} \cdot K_r + \lambda_{корп} \cdot K_3) \cdot K_{Пр}, \quad (6)$$

где: $\lambda_{кр}$ – интенсивность отказов кристалла; K_r – коэффициента режима, зависящий от температуры кристалла; $\lambda_{корп}$ – интенсивности отказов корпуса; K_3 – коэффициент эксплуатации, зависящий от жесткости условий эксплуатации. $K_{Пр}$ – коэффициент приемки, зависящий от уровня качества ИС.

Модель (6) обладает теми же ограничениями, что и модель (4), т.к. значение $\lambda_{кр}$ также имеет ограничение по сложности ИС. Нетрудно заметить, что модель (6) заимствована из стандарта [4]:

$$\lambda_p = (C_1 \cdot \pi_r + C_2 \cdot \pi_E) \cdot \pi_Q \cdot \pi_L \cdot 10^{-6}, \quad (7)$$

где: C_1 – интенсивность отказов кристалла; π_r – коэффициента режима, зависящий от температуры кристалла; C_2 – интенсивность отказов корпуса; π_E – коэффициент эксплуатации, зависящий от жесткости условий эксплуатации; π_Q – коэффициент приемки, зависящий от уровня качества ИС; π_L – коэффициент, зависящий от продолжительности периода выпуска ИС.

Заметим, что значение π , определяется по формуле стандарта [5]:

$$\pi_T = 0,1 \cdot \exp \left[\frac{-E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_{jp} + 273} - \frac{1}{298} \right) \right], \quad (8)$$

где: E_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T_{jp} – рабочая температура кристалла, °С.

Модель (7) обладает теми же ограничениями, что и модели (4) и (6), т.к. значение C_1 также имеет ограничение по сложности ИС. Однако для КМОП СБИС, степень интеграции которых превышает 60000 в стандарте [5] приведена следующая математическая модель:

$$\lambda_p = (\lambda_{BD} \cdot \pi_{MGF} \cdot \pi_T \cdot \pi_{CD} + \lambda_{BP} \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_{PT} + \lambda_{EOS}) \cdot 10^{-6}. \quad (9)$$

В модели (9) первое слагаемое характеризует интенсивность отказов кристалла, второе – интенсивность отказов корпуса, а третье (λ_{EOS}) – интенсивность отказов, обусловленных стойкостью ИС к воздействию электростатического разряда.

Кардинальным отличием модели (9) от моделей (4), (6) и (7) является присутствие в ней слагаемого λ_{EOS} , что особенно важно для расчетов КМОП СБИС, входящих в состав аппаратуры, расположенной на внешней поверхности КА.

В стандарте [5] приведена следующая формула для расчета λ_{EOS} :

$$\lambda_{EOS} = - \frac{\ln \left[1 - 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-2 \cdot 10^{-4} \cdot V_{TH}) \right]}{8,76 \cdot 10^{-3}}, \quad (10)$$

где V_{TH} – максимально допустимое напряжение электростатического разряда.

По сути, модель (9) можно рассматривать как макро модель по отношению к полной модели, которая приведена в «Appendix В» стандарта [5]:

$$\lambda_p = (\lambda_{OX} + \lambda_{MET} + \lambda_{HC} + \lambda_{CON} + \lambda_{PAC} + \lambda_{ESD} + \lambda_{MIS}) \cdot 10^{-6}, \quad (11)$$

где: λ_{OX} , λ_{MET} , λ_{HC} , λ_{CON} и λ_{MIS} характеризуют интенсивность отказов кристалла; λ_{PAC} характеризует интенсивность отказов корпуса; $\lambda_{ESD} = \lambda_{EOS}$.

Подробное описание модели (11) и метод расчета значений ее составляющих приведены в [6]. Однако значения эмпирических коэффициентов, которые входят в расчетные формулы составляющих модели (11), получены для технологий, минимальный размер которых не ниже 0,8 мкм, что также делает методологию [6] мало пригодной для практических расчетов современных ИС [7].

Развитием методов прогнозирования надежности КМОП СБИС, приведенных в [6] является методология 217Plus™ [8]. В стандарте [8] приведены модели расчета интенсивности отказов ИС отдельно для пластиковых и герметичных корпусов. Однако методология 217Plus™ основана на методах стандарта [9], которые требуют экспериментальных исследований и испытаний аппаратуры. Поскольку на ранних этапах проектирования такие данные отсутствуют, то расчеты по моделям стандарта [8] придется проводить на основе «типовых» (усредненных) значений параметров и коэффициентов. Естественно, что в этом случае точность оценки интенсивностей отказов КМОП СБИС будет весьма невысокой.

Таким образом, можно констатировать, что «узаконенные» в стандартах модели и методы расчетной оценки надежности «сверхбольших» ИС мало пригодны для практических расчетов КМОП СБИС, применяемых в аппаратуре КА.

Вместе с тем, ведущие фирмы-производители ИС регулярно публикуют отчеты о надежности своей продукции. На рис. 1 и 2, в качестве примера, приведены выдержки из такого отчета [10] фирмы XILINX.

Process Technology	Device Hours at $T_j = 125^\circ\text{C}$	FIT ⁽¹⁾
0.040 μm	1,061,660	24
0.045 μm	1,308,770	9
0.065 μm	2,841,216	4
0.09 μm	10,688,689	2
0.13 μm	2,228,685	5
0.15 μm (FPGA)	3,287,432	4
0.15 μm (EPROM)	2,110,352	12
0.18/0.15 μm	2,549,331	10
0.18 μm	3,777,837	14
0.22/0.18 μm	2,115,203	6
0.22 μm	1,921,346	6
0.25 μm	3,133,971	4
0.35 μm /0.25 μm	2,200,928	5
0.35 μm	4,498,059	15
0.35 μm (EPROM)	1,051,816	24
0.5 μm	2,090,846	12
0.6 μm	813,893	14
0.6 μm (EPROM)	1,069,748	23

Notes:

1. FIT is calculated based on 0.7 eV (0.58 eV for EPROM), 60% C.L. and T_j of 55°C .

Рис. 1. Интенсивность отказов кристаллов ИС

Table 2-24: HTOL Test Results for 0.09 μm SI Gate CMOS Device Type XC4VxXxxx

Device	Lot Quantity	Fall Quantity	Device Quantity	Actual Device Hours at $T_j \geq 125^\circ\text{C}$	Equivalent Device Hours at $T_j = 125^\circ\text{C}$	Failure Rate at 60% CL and $T_j = 55^\circ\text{C}$ (FIT)
XC4VLX60	5	1 ⁽¹⁾	226	344,295	719,573	
XC4VLX80	3	0	165	265,545	712,858	
XC4VLX100	1	0	45	90,855	259,245	
XC4VFX60	1	0	42	84,630	182,316	
XC4VSX25	1	0	37	75,757	100,039	
XC4VSX55	1	0	45	90,045	222,731	
XC4VxXxxx	12	1	560	951,127	2,196,762	12 FIT

Notes:

1. Failure due to substrate defect. Process improvement has been implemented.

Рис. 2. Интенсивность отказов кристаллов ИС семейства XC4VxXxxx

Кроме того в [10] приведена и формула для расчета значений ускоряющего фактора A :

$$A = \exp \left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_{JP} + 273} \right) \right], \quad (12)$$

где: E_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T_{JP} – рабочая температура кристалла, $^\circ\text{C}$.

Сравнивая формулы (8) и (12) нетрудно заметить, что они совпадают с точностью до значений постоянных коэффициентов. Кроме того, принимая во внимание, что произведение:

$$\lambda_{BD} \cdot \pi_{MGF} \cdot \pi_{CD}$$

в модели (9) является ничем иным, как базовой интенсивностью отказа кристалла (λ_C), то очевидно, что использование таких данных позволит повысить достоверность оценки интенсивностей отказов ИС. Для этого можно использовать модель (9), преобразовав ее к следующему виду:

$$\lambda_{\Sigma} = K_{III} \cdot (\lambda_C \cdot 10^{-3} \cdot A + \lambda_{BP} \cdot K_{\Sigma} \cdot \pi_Q \cdot \pi_{PT} + \lambda_{EOS}) \cdot 10^{-6}, \quad (13)$$

где: λ_C – интенсивность отказов кристалла, FIT; A – ускоряющий фактор; λ_{BP} , π_Q , π_{PT} , λ_{EOS} – параметры и коэффициенты модели (9); K_{III} – коэффициент модели (3); K_{Σ} – коэффициент модели (6).

Значения λ_{BP} , π_Q , π_{PT} и λ_{EOS} определяются по моделям и таблицам стандарта [5]. Значение K_{III} определяется по справочнику [2]. Значение K_{Σ} определяется по таблицам справочника [3]. Значения λ_C и A определяются по данным, приведенным в отчетах по надежности фирм-производителей.

Следует отметить, что в модели (13) объединены два подхода к оценке надежности КМОП СБИС, а именно модели и методы справочников и стандартов [2, 3, 5] и методологии 217PlusTM [8]. Такой подход позволяет предложить следующую методику расчета интенсивности отказов КМОП СБИС:

1. На основе данных Data Sheet на КМОП СБИС определяется фирма-производитель.
2. Для этой фирмы находится отчет по надежности (Device reliability report).
3. Типономинал КМОП СБИС идентифицируется в соответствии с классификацией Device reliability report.
4. По данным Device reliability report определяются численные значения интенсивности отказов кристалла (λ_C), энергии активации (E_a) и рассчитывается значение ускоряющего фактора (A).
5. По данным справочника [2] определяется значение коэффициента K_{III} .
6. По таблицам справочника [3] определяется значения коэффициента K_{Σ} .
7. По данным стандарта [5] определяются численные значения коэффициентов π_Q , π_{PT} и рассчитываются значения составляющих λ_{BP} и λ_{EOS} .
8. Рассчитывается значение эксплуатационной интенсивности отказов КМОП СБИС по формуле (13).

В заключении хотелось бы заметить, что в ближайшее время выходят новые (2012 г.) редакции справочников [2, 3]. Будем надеяться, что в них или подобным образом, или как-то иначе, но будет решена проблема расчетной оценки надежности современных КМОП СБИС.

Список литературы

1. ОСТ 4Г 0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности. – 49 с.
2. Справочник «Надежность ЭРИ». – РФ: МО, 2006. – 641 с.
3. Справочник «Надежность ЭРИ ИП». – РФ: МО, 2006. – 52 с.
4. MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment. Notice 2. – USA: DoD, 1995.
5. MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment. – USA: DoD, 1991.
6. RADC-TR-89-177. VHSIC/VHSIC-LIKE. Reliability prediction modeling. – USA: RADC, 1989. – 324 р.
7. Жаднов В.В., Полесский С.Н., Якубов С.Э. Прогнозирование безотказности микросхем для военной и аэрокосмической электроники. – Электронные компоненты. – 2007. – № 3. – С. 39–48.
8. RIAC-HDBK-217Plus. Handbook of 217Plus™ reliability prediction models. – USA: RIAC, 2006. – 170 р.
9. MIL-HDBK-344A. Environmental stress screening (ESS) of electronic equipment. – USA: DoD, 1993.
10. UG116 (v 8.0). Device reliability report. – XILINX, 2011 – 118 р.

*Московский государственный институт электроники и математики (МИЭМ), г. Москва.
Статья поступила 05.11.2011.*

Abrameshin A.E., Zhadnov V.V., Zhadnov I.V.

Estimation Reliability of Electronic Module Equipment Spacecraft

In the article the features of the apparatus for calculating the reliability of spacecraft, which includes «extra large» and «ultra fasting» integrated circuit last generations.

Spacecraft, Electronics, CMOS VHSIC, Reliability

The Moscow state institute of electronics and mathematics.