

# Сравнительный анализ методов оценки надежности полупроводниковых интегральных микросхем

Жаднов В.В.

*Кафедра Радиозлектроники и телекоммуникаций,  
Московский институт электроники и математики национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва*

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2013 году. Интегральные микросхемы (ИС) широко применяются в современных электронных средствах (в.ч. и в бортовой электронной аппаратуре для диагностики и мониторинга технического состояния распределенных систем) и в значительной степени определяют их показатели надежности.

По классификации ГОСТ 27.003 [1] ИС относится к изделиям общего назначения вида I (высоконадежное комплектующее изделие межотраслевого применения), непрерывного длительного применения, невосстанавливаемое, необслуживаемое, переход которого в предельное состояние не ведет к катастрофическим последствиям, изнашиваемое, стареющее при хранении. Для таких изделий нормируются следующие показатели надежности:

- интенсивность отказов -  $\lambda$
- средний ресурс до списания (полный) -  $T_{p,cr,сп}$
- средний срок сохраняемости -  $T_{c,сп}$

Поскольку свойство надежности проявляется при эксплуатации ИС, то для оценки его показателей на ранних этапах проектирования бортовой электронной аппаратуры для диагностики и мониторинга технического состояния распределенных систем применяются расчетные методы. Для обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов расчетов, в соответствии с требованиями ГОСТ 27.301 [2] и РДВ 319.01.20 [3], эти методы стандартизованы.

Так, ГОСТ 27.301 [2] для расчета интенсивностей отказов серийно выпускаемых и новых электронных и электротехнических элементов разных типов (в т.ч. ИС) с учетом уровня их нагруженности, качества изготовления, областей применения аппаратуры, в которой используются элементы, рекомендует методики, приведенные в американском военном стандарте MIL-HDBK-217 [4] и в отечественных справочниках по надежности электрорадиоизделий [5, 6].

В справочнике «Надежность ЭРИ» [5] приведены математические модели для расчета эксплуатационной интенсивности отказов отдельных групп (типоминалов) интегральных микросхем (см. табл. 1).

Модель (1), а также значения базовой интенсивности отказов группы интегральных микросхем ( $\lambda_{б,с,г}$ ) используются при расчете эксплуатационной интенсивности отказов  $\lambda_3$  всех типоминалов интегральных микросхем. Модель (2) используется при расчете эксплуатационной интенсивности отказов  $\lambda_3$  тех типоминалов интегральных микросхем, которые имеют повышенные значения интенсивности отказов.

Значения коэффициента  $K_{с,т}$ , учитывающего сложность (степень интеграции) ИС и температуру окружающей среды рассчитываются по модели:

$$K_{с,т} = A \cdot e^{B(t+273)}$$

где: A - коэффициент, зависящий от группы ИС и количества элементов, бит (для ЗУ); B - постоянный коэффициент модели; t - температура окружающей среды.

Математические модели  $\lambda_3$ , приведенные в справочнике «Надежность ЭРИ ИП» [5] аналогичны методам стандарта MIL-HDBK-217F [4] - см. табл. 2.

Таблица 1. Математические модели эксплуатационной интенсивности отказов ИС

№ п.п.	Группа ИС	Вид математической модели	Примечание
1	2	3	4
1	Микросхемы интегральные полупроводниковые цифровые: логические, арифметические, микропроцессоры и микропроцессорные комплекты, программируемые логические матрицы, регистры сдвига, базовые матричные кристаллы и др.	$\lambda_3 = \lambda_{б.с.г} \cdot K_{с.г} \cdot K_{корп} \cdot K_v \cdot K_3 \cdot K_{пр}$ или $\lambda_3 = \lambda_{б.с.г} \cdot K_{с.г} \cdot K_{корп} \cdot K_v \cdot K_3 \cdot K_{пр}$	(1) (2)
2	Оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)		
3	Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ, ППЗУ, РПЗУ)		
4	Микросхемы интегральные полупроводниковые аналоговые		

Таблица 2. Математические модели эксплуатационной интенсивности отказов ИС

№ п.п.	Группа ИС	Вид математической модели
1	2	3
1	Микросхемы цифровые	$\lambda_3 = (\lambda_{кр} \cdot K_t + \lambda_{корп} \cdot K_3) \cdot K_{пр}$ (3)
2	Микросхемы аналоговые	
3	Микросхемы памяти	
4	Программируемые логические интегральные схемы	
5	Микропроцессоры	

Значение  $\lambda_{кр}$  зависит от сложности ИС. Значения коэффициента  $K_t$ , учитывающего температуру окружающей среды рассчитываются по модели:

$$K_t = 0,1 \cdot e^{\left[ \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_j} - \frac{1}{298} \right) \right]}$$

где:  $E_a$  - энергия активации;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T_j$  - температура кристалла ИС.

Область применения моделей (1), (2) и (3) ограничена сложностью ИС, для которой приведены значения коэффициентов А (или  $\lambda_{кр}$ ). Для сверхбольших КМОП ИС, сложность которых выходит за ограничения этих моделей, в стандарте MIL-HDBK-217F [4] приведена следующая математическая модель интенсивности отказов:

$$\lambda_p = \lambda_{BD} \cdot \pi_{MGF} \cdot \pi_T \cdot \pi_{CD} + \lambda_{BP} \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_{PT} + \lambda_{EOS} \quad (4)$$

В модели (4) первое слагаемое характеризует интенсивность отказов кристалла, второе - интенсивность отказов корпуса, а третье - стойкость СБИС к воздействию электростатического разряда (ЭСР).

Значения коэффициента  $\pi_{CD}$ , учитывающего сложность СБИС, рассчитываются по модели:

$$\pi_{CD} = \left[ \frac{A}{0,21} \cdot \left( \frac{2}{X_s} \right)^2 \cdot 0,64 \right] + 0,36 \quad (5)$$

где: A - площадь кристалла;  $X_s$  - топологический размер.

Однако, как следует из стандарта MIL-HDBK-217F [4], эмпирические коэффициенты модели (5) получены для СБИС с топологическим размером не менее 0,8 мкм.

Общим свойством моделей (1)-(4) является то, что они позволяют рассчитать  $\lambda$ , периода «нормальной работы» (см. рис. 1), в предположении, что справедлива экспоненциальная модель отказов:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6)$$



Рис. 1. Зависимость  $\lambda$  от времени

Вместе с тем, в ГОСТ 27.005 [7] наряду с моделью (6) рекомендован еще целый ряд моделей (логнормальное, Вейбулла и др.), обоснование выбора которых может основываться не только на статистических критериях согласия, но и на анализе процессов, протекающих в конструкции ИС и приводящих к отказам (на методах «физики отказов»).

Характерными механизмами отказов КМОП ИС являются [8]:

- пробой подзатворного диэлектрика;
- электромиграция;
- генерация «горячих носителей»;
- межслойные дефекты изоляционных диэлектриков;
- дефекты p-n переходов;
- дефекты маскирования;
- образование пустот.

Эти механизмы обусловленными процессами деградации, которые могут быть аппроксимированы марковскими процессами диффузионного типа с немонотонными реализациями (рис. 2).

Для таких процессов в ГОСТ 27.005 [7] приведена модель отказов (DN-распределение) вида:

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\alpha \cdot t - 1}{v \cdot \sqrt{\alpha \cdot t}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\alpha \cdot t + 1}{v \cdot \sqrt{\alpha \cdot t}}\right) \quad (7)$$

где:  $\Phi$  - функция нормированного нормального распределения;  $\alpha$  - средняя скорость процесса деградации (изменения определяющего параметра X);  $v$  - коэффициент вариации процесса деградации (скорости деградации).

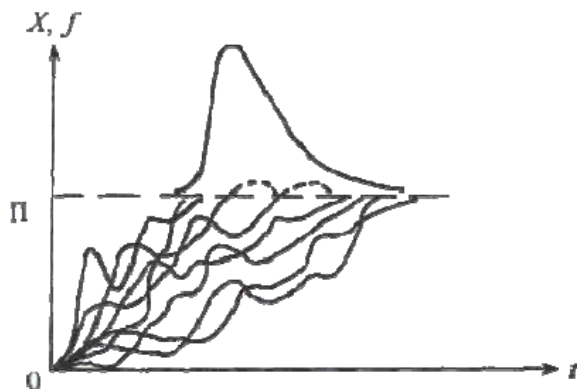


Рис. 2. Реализации случайного процесса изменения определяющего параметра  $X$  ( $\Pi$  - предельное значение  $X$ ) и плотность вероятности наработки  $f$

Однако, как следует из (7), эта модель может применяться для «обобщенного» процесса деградации ИС (обобщенного определяющего параметра). В «Appendix В» стандарта MIL-HDBK-217F [4] приведена математическая модель интенсивности отказов КМОП ИС, учитывающая каждый из отказовых механизмов:

$$\lambda_p(t) = \lambda_{OX}(t) + \lambda_{MET}(t) + \lambda_{HC}(t) + \lambda_{CON}(t) + \lambda_{MIS}(t) + \lambda_{PAC} + \lambda_{EOS}, \quad (8)$$

где:  $\lambda_{OX}(t)$  - интенсивность отказов кристалла, обусловленная эффектом пробоя подзатворного диэлектрика;  $\lambda_{MET}(t)$  - интенсивность отказов кристалла, обусловленная эффектом электромиграции;  $\lambda_{HC}(t)$  - интенсивность отказов кристалла, обусловленная эффектом горячих носителей;  $\lambda_{CON}(t)$  - интенсивность отказов кристалла, обусловленная эффектом точечных дефектов;  $\lambda_{MIS}(t)$  - интенсивность отказов кристалла, обусловленная прочими эффектами;  $\lambda_{PAC}$  - интенсивность отказов корпуса;  $\lambda_{EOS}$  - интенсивность отказов ИС, учитывающая стойкость к воздействию ЭСР.

Подробное описание слагаемых модели (8) и методов их расчета приведено в RADS-TR-89-177 [9]. Кроме того модель (4) представляет собой упрощенную модель (8), позволяющую получить верхнюю оценку значения  $\lambda$ . Как следует из (8),  $\lambda$  является функцией времени, поэтому в этом случае в качестве модели отказов (функции распределения наработки) следует использовать общую формулу:

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda_p(t) dt}. \quad (9)$$

Очевидно, что использование моделей (8) и (9) целесообразно при проектировании СБИС, но мало пригодно при расчетах надежности аппаратуры, что обусловлено не столько сложностью и трудоемкостью расчетов, сколько практическим отсутствием в нормативно-технической документации (ТУ и Data Sheet) данных о конструктивных, технологических и др. параметрах СБИС, необходимых для расчетов слагаемых модели (8), за исключением слагаемых  $\lambda_{PAC}$  [10] и  $\lambda_{EOS}$  [11].

Это подтверждается и методологией 217Plus™ [12] прогнозирования безотказности аппаратуры. Так, в RIAC-HDBK-217Plus [12] приведены модели интенсивности отказов ИС (отдельно для ИС в герметичных и негерметичных

корпусах). Например, модель интенсивности отказов ИС в негерметичном (пластиковом) корпусе имеет вид:

$$\lambda_p = \pi_G \cdot (\lambda_{OV} \cdot \pi_{DCO} \cdot \pi_{TO} + \lambda_{EB} \cdot \pi_{DCN} \cdot \pi_{RNT} + \lambda_{TCB} \cdot \pi_{CR} \cdot \pi_{DT}) + \lambda_{SIB} \cdot \pi_{SIDT} + \lambda_{EOS} \quad (10)$$

В модели (10) первое слагаемое характеризует интенсивность отказов в режиме работы, ожидания и термоциклирования, второе - интенсивность отказов выводов, а третье - стойкость ИС к ЭСР. Не вдаваясь в подробное рассмотрение модели (10) можно отметить следующее:

- во-первых,  $\lambda$  в этой модели не зависит от времени
- во-вторых, все данные, необходимые для расчетов составляющих модели (10), приведены в соответствующих разделах IAC-HDBK-217Plus [12].

Следует отметить, что в справочниках [4-6, 12] приводятся «усредненные» значения базовой интенсивности отказов ( $\lambda_0$ ) для групп (подгрупп) ИС. Вместе с тем, ведущие фирмы-производители ИС регулярно публикуют отчеты о надежности своей продукции, полученные по результатам испытаний. На рис. 3, в качестве примера, приведены выдержки из такого отчета фирмы XILINX [13].

Table 2-24: HTOL Test Results for 0.09  $\mu$ m Si Gate CMOS Device Type XC4VxXxxx

Device	Lot Quantity	Fail 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	3	0	136	230,316	531,451	
XC4VLX80	1	0	75	150,525	410,767	
XC4VLX100	1	0	45	90,855	259,245	
XC4VLX160	2	2 <sup>(1)</sup>	89	174,132	721,939	
XC4VFX12	1	0	45	90,000	116,627	
XC4VFX60	1	0	42	84,630	182,316	
XC4VxXxxx	9	2	432	820,458	2,222,345	18 FIT

**Notes:**

1. Failure due to substrate defect. New process improvement has been implemented.

Рис. 3. Интенсивность отказов кристаллов ИС семейства XC4VxXxxx

Значение интенсивности отказов рассчитано на основе следующего соотношения:

$$\lambda = \frac{\chi^2(P, m)}{2 \cdot N \cdot \Delta t \cdot A} \cdot 10^9 \quad (11)$$

где:  $\chi^2$  - распределение хи-квадрат; P - доверительная вероятность; N - общее число испытуемых ИС; A - ускоряющий фактор;  $\Delta t$  - время испытаний.

Применение формулы (11) для расчета интенсивности отказов возможно только для случая, когда «ранние» отказы исключены тренировкой ИС, поэтому оценка интенсивности отказов ИС, полученная с использованием статистики  $\chi^2$ , справедлива только для периода «нормальной работы» (см. рис. 1).

Пересчет значения  $\lambda$  к «нормальной» температуре может быть проведен по модели ускоряющего фактора A:

$$A = \exp \left[ \frac{E_a}{k} \cdot \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{T_j + 273} \right) \right]$$

Таким образом, очевидно, что использование экспериментальных данных фирм-производителей позволит повысить точность оценки надежности СБИС. Однако

следует помнить о том, что ряд коэффициентов моделей (1)-(4) и (10), учитывающих влияние соответствующих факторов на интенсивность отказов кристалла ИС, «автоматически» войдет в значение  $\lambda$ , полученное по результатам испытаний.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что рассмотренные выше методы расчетной оценки надежности полупроводниковых ИС могут применяться для расчетной оценки надежности бортовой электронной аппаратуры диагностики и мониторинга технического состояния распределенных систем при условии использования экспериментальных данных о характеристиках надежности, публикуемых фирмами-производителями [14].

### **Список литературы**

1. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
2. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
3. РДВ 319.01.20-98. Положение о справочнике «Надежность электрорадиоизделий».
4. MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment.
5. Справочник «Надежность ЭРИ». - М.: МО РФ, 2006.
6. Справочник «Надежность ЭРИ ИП» - М.: МО РФ, 2006.
7. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.
8. Сетун А.Н. Физика отказов приборов микро- и нанoeлектроники. - Минск: БГУ, 2010. - 125 с.
9. RADS-TR-89-177. VHSIC/VHSIC-LIKE. Reliability prediction modeling.
10. Жаднов В.В., Полесский С.Н., Якубов С.Э. Прогнозирование безотказности микросхем для военной и аэрокосмической электроники. / Электронные компоненты. № 3, 2007. - с. 39-48.
11. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Жаднов И.В. Расчетная оценка надежности электронных модулей аппаратуры космических аппаратов. / Технологии ЭМС, № 1 (40), 2012. - с. 29-33.
12. RIAC-HDBK-217Plus. Handbook of 217Plus™ reliability prediction models.
13. UG116 (v 9.1). Device reliability report: Second quarter 2012. - XILINX, 2012.
14. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Полесский С.Н. Информационная технология обеспечения надежности электронных средств наземно-космических систем: научное издание. - Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2012. - 565 с.