

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ МИКРОСХЕМ ДЛЯ ВОЕННОЙ И АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Валерий Жаднов, доцент МИЭМ, к.т.н., доц., лауреат премии Правительства РФ

Сергей Полесский, аспирант МИЭМ

Сергей Якубов, магистрант МИЭМ

Основой современной аппаратуры военной и аэрокосмической техники являются перспективные электронные компоненты, в т.ч. сверхбольшие и сверхбыстродействующие микросхемы последних поколений. Одним из критериев применения таких микросхем является их уровень надежности, т.к. он в значительной степени определяет и надежность аппаратуры в целом. На ранних этапах проектирования оценка надежности проводится, как правило, расчетными методами, основанными на математических моделях эксплуатационной интенсивности отказов. В статье рассматриваются отечественные и зарубежные методики расчета и прогнозирования безотказности микросхем и приводятся примеры их применения.

Создание современной аппаратуры, приборов и устройств для военной и аэрокосмической техники предполагает применение перспективной элементной базы, которая включает в себя и микросхемы последних поколений. Существенным ограничением является то, что в такой аппаратуре разрешено применять электрорадиоизделия (ЭРИ) с приемкой (уровнем качества) не ниже «5»-й. Методы расчета надежности таких ЭРИ стандартизованы в нормативных документах, таких, как справочник «Надежность ЭРИ». Стандартизация моделей, методов их решения и данных о надежности ЭРИ связана с тем, что расчеты надежности аппаратуры являются обязательными мероприятиями, предусмотренными в «Программе обеспечения надежности при разработке» (ПОНр).

Однако расчеты характеристик безотказности микросхем (в первую очередь, эксплуатационной интенсивности отказов — $\lambda_{\text{э}}$) вызывают значительные трудности, т.к. в отечественном справочнике «Надежность ЭРИ» и математические модели $\lambda_{\text{э}}$, и численные значения их коэффициентов приведены для микросхем не выше 5-й степени интеграции. Так, в справочнике приведена следующая градация для группы «Микросхемы интегральные полупроводниковые цифровые...», в зависимости от степени интеграции (см. табл. 1).

Исходя из формы представления данных в таблице 1, можно предположить, что это не что иное, как таб-

личное задание функции $A(N)$. Такое предположение может спровоцировать желание подобрать аппроксимацию функции $A(N)$ и использовать ее для экстраполяции (прогнозирования). А для значений N больших, чем $2,5 \cdot 10^5$ (тем более, что относительное прращение A на последнем интервале меньше, чем на предпоследнем — см. табл. 1). Однако такая «экстраполяция», применяемая на практике при расчете микросхем, ничем не обоснована (так же, как и полученные с ее помощью «экстраполированные» значения $\lambda_{\text{э}}$).

Вместе с тем модели прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов (*reliability prediction*) для «сверхбыстродействующих» и «сверхбольших» микросхем ($N > 6 \cdot 10^4$ вентиляй) не только давно известны, но также стандартизованы за рубежом (см. американский стандарт *MIL-HDBK-217F* [1] — ред. 1991 г., п. 5.3). Что касается других методик прогнозирования надежности микросхем (например, *TR-332, issue 6 — Bellcore*), то они здесь рассматриваться не будут, т.к. они предназначены для оценки безотказности ЭРИ промышленного применения («0»-й приемки, что соответствует уровню качества *Industry* и ниже).

В этой связи нельзя не упомянуть о том, что часть моделей *MIL-HDBK-217F* (включая п. 5.3) были реализованы в «Автоматизированной системе расчета надежности ЭРИ зарубежного производства» (*ACRH-F*, ОАО «РНИИ «ЭлектронСтандарт»),

не говоря уже о программных средствах зарубежных производителей (*Relax Software Corp.*, *ReliaSoft Corp.*, *A.L.D. Group*, *BQR Reliability Engineering Ltd.*, *Isograph Inc.*, *Dyadem International Ltd.*, *RELIASS Inc.* и др.). Кроме того, именно потребность российских предприятий-разработчиков аппаратуры в расчетах надежности ЭРИ зарубежного производства и послужила в 2001 г. толчком к созданию новой (4.0) версии программного комплекса (ПК) АСОНИКА-К (*ASKSoft-MIEM*). На рис. 1 в качестве примера приведены результаты расчета (прогноза) интенсивности отказов (λ_p) процессора *C8051F305* по модели п. 5.3 *MIL-HDBK-217F* и ее температурная зависимость, рассчитанные в ПК АСОНИКА-К.

Применение перспективных микросхем в аппаратуре военной и аэрокосмической техники привело к тому, что, начиная с 2002 г. пока не в справочник, а в «Приложение» к «Автоматизированной системе расчета надежности» (ACRH — ФГУП «22 ЦНИИ МО РФ») и в саму систему были добавлены модели $\lambda_{\text{э}}$. Впрочем, эти модели (в т.ч. и модели АСРН-2004 г.) аналогичны моделям АСРН-*F* и практически ничем не отличаются от моделей λ_p .

Таблица 1. Значения коэффициента A для группы «Микросхемы интегральные полупроводниковые цифровые...»

Количество элементов, N	A
До 10	$12,24 \cdot 10^{-4}$
$11 \dots 1 \cdot 10^2$	$16,32 \cdot 10^{-4}$
$101 \dots 1 \cdot 10^3$	$20,40 \cdot 10^{-4}$
$1001 \dots 5 \cdot 10^3$	$36,72 \cdot 10^{-4}$
$5001 \dots 1 \cdot 10^4$	$81,60 \cdot 10^{-4}$
$10001 \dots 5 \cdot 10^4$	$99,96 \cdot 10^{-4}$
$50001 \dots 1 \cdot 10^5$	$16,32 \cdot 10^{-3}$
$100001 \dots 2,5 \cdot 10^5$	$18,36 \cdot 10^{-3}$

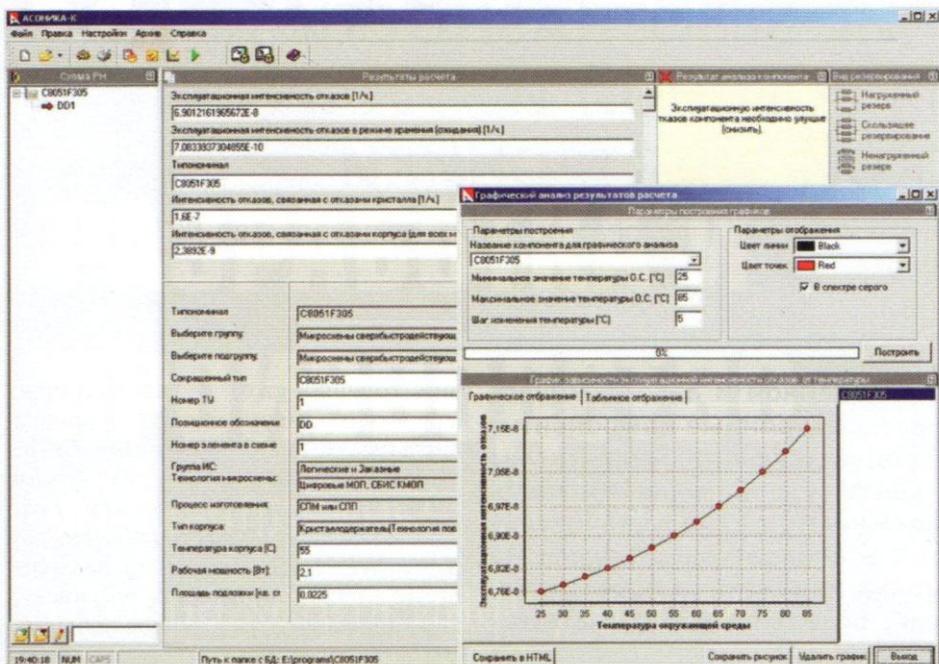


Рис. 1. ПК АСОНИКА-К:
результаты расчета λ_3 и температурной зависимости процессора C8051F305

(п. 5.3 MIL-HDBK-217F). Это отчасти характеризует исследования, выполняемые разработчиками справочника, а также результаты, используемые при выпуске новых редакций справочника, «Приложений» и версий АСРН. Тем более, что модели п. 5.3 MIL-HDBK-217F весьма приближенные, а для получения адекватной оценки λ_p необходимо использовать «Приложение Б» (Appendix B) того же MIL-HDBK-217F, в котором приведена уточненная модель прогнозирования безотказности $\lambda_p(t)$, основанная на конструктивно-технологических параметрах микросхем.

Хотя для расчета по модели (Appendix B) кроме данных ТУ (Data Sheet), требуется еще и информация о конструктивных и технологических особенностях микросхем и режимах технологической электротермопрессии, но достаточно иметь доступ к интернету, чтобы найти все необходимые данные (например, на сайтах производителей выложены Quality & reliability monitors и т.п.).

На первый взгляд, никаких проблем с инженерным расчетом безотказности микросхем высокой степени интеграции нет и быть не должно: есть АСРН, есть и Appendix B, содержащий алгоритм уточненного расчета $\lambda_p(t)$. Кроме того, еще известен целый ряд работ, в которых исследователи, опираясь на методологию Appendix B, развиваются и совершенствуют методы прогнозирования безот-

казности микросхем (например, НИИ СИ РАН, ГОУ ВПО «МИЭТ», ГОУ ВПО «ВГТУ», ФГУП «НИИ А», а также многочисленные работы иностранных авторов).

Впрочем, все эти методы в России пока не стандартизованы, и на практике по-прежнему применяют Appendix B. Однако, как оказалось, «алгоритм» расчета λ_3 , приведенный в Appendix B, по своей сути не является таковым, несмотря на то, что формальные признаки алгоритма присутствуют: определен тип задачи, установлен порядок выполнения операций (процессов) и заданы операторы (математические модели, их переменные и константы). Но практически полное отсутствие пояснений, ряд неточностей в моделях и их коэффициентах, а также необходимость в дополнительных данных о режимах операции электротермопрессии техпроцесса производства микросхем делает проведение расчета $\lambda_p(t)$ для любого лица (инженера) не тривиальной задачей.

В подтверждение этого покажем, во что выливается простой инженерный расчет только одного из слагаемых модели $\lambda_p(t)$, а именно интенсивности отказов корпуса (Package failure rate) — λ_{PAC} . При проведении расчета не станем углубляться в теоретические аспекты, связанные с адекватностью моделей (тем более что этому посвящена не одна публикация), а будем опираться лишь на базовые знания в области физики отказов, теории вероятнос-

тей и здравый смысл (соответствие размерностей величин, их порядок и т.п.).

Итак, в Appendix B приведена следующая математическая модель λ_{PAC} :

$$\lambda_{\text{PAC}} = (0,0024 + 1,85 \cdot 10^{-5} (\#Pins)) \times \pi_E \pi_Q \pi_{PT} + \lambda_{PH}, \quad (1)$$

где $\#Pins$ — число выводов корпуса, шт.; π_E , π_Q , π_{PT} — коэффициенты, отн. ед.; λ_{PH} — package hermeticity factor (коэф. герметичности корпуса).

Размерность констант 0,0024 и $1,85 \cdot 10^{-5}$ не определена, но исходя из того, что λ_{PAC} имеет размерность, 1/ч. то у константы 0,0024 должна быть, 1/ч. а у константы $1,85 \cdot 10^{-5}$ — 1/(шт.·ч). Впрочем, это не самая сложная задача.

Попутно отметим, что если принять $\#Pins = \lambda_{PH} = 0$ и минимальные значения для $\pi_E = 0,5$; $\pi_Q = 0,25$; $\pi_{PT} = 1,0$, то $\lambda_{\text{PAC}} = 3,0 \cdot 10^{-4}$. Другими словами, интенсивность отказов микросхем в корпусах не может быть ниже $3,0 \cdot 10^{-4}$. Очевидно, что в (1) потерян множитель, другое дело какой — FIT (10^{-9}) или 10^{-6} . Исходя из того, что в MIL-HDBK-217F все модели λ_p имеют множитель 10^{-6} , следует принять последний. Правда, остается вопрос, к чему он относится — только к первому слагаемому или к сумме в целом? Это можно будет установить, лишь зная порядок переменной λ_{PH} .

λ_{PH} характеризует интенсивность отказов микросхем в негерметичных корпусах (plastic package). Для нее приведена следующая математическая модель:

$$\lambda_{PH} = \frac{0,399}{t \sigma_{PH}} \exp \left[-\frac{0,5}{\sigma_{PH}^2} (t - t_{50PH})^2 \right], \quad (2)$$

где t — время; $\sigma_{PH} = 0,74$.

Если с σ_{PH} формальных проблем нет, так как задано его значение, то с тем, что подразумевается под t , неясно. С одной стороны, в Appendix B t — время, на котором определяются значения ряда слагаемых $\lambda_p(t)$, например $\lambda_{ox}(t)$, а с другой стороны, λ_{PH} относится к тем слагаемым $\lambda_p(t)$, которые не зависят от t , т.е. $\lambda_{PH}(t) = const$. Исходя из этого можно предположить, что в (2) допущена погрешность, т.е. под t следует понимать screening time (время технологической электротермопрессии — t_{ETT}). Кроме того, из пояснения: t — время (в 10^6 ч) можно сделать вывод относительно порядка t в (2), а именно, что:

$$t = t_{ETT} / 10^6, \text{ ч} \cdot 10^6.$$

Перепишем (2) в более привычном виде:

$$\lambda_{\text{PH}} = \frac{1}{\sigma_{\text{PH}} \sqrt{2\pi t}} \exp \left[-\frac{(\ln t - \ln t_{50\text{PH}})^2}{2\sigma_{\text{PH}}^2} \right]. \quad (3)$$

Несложно догадаться, что (3) представляет собой функцию плотности вероятности логарифмически-нормального распределения ($t_{50\text{PH}}$, σ_{PH} — параметры распределения), график которой приведен на рисунке 2.

Исходя из того, что при увеличении времени электротермотренировки ($t_{\text{ЭТР}}$) интенсивность отказов (λ_{PAC} , следовательно, и λ_{PH}) должны снижаться, можно прийти к выводу, что модель (3) справедлива при условии:

$$M_0 \leq t_{50\text{PH}} \leq t, \quad (4)$$

где M_0 — мода.

Так как t ($t_{\text{ЭТР}}$) не может быть бесконечно, то при ужесточении условий электротермотренировки [повышении температуры (*ambient temp.*, — T_A), влажности (*relative humidity* — $RH\%$) и напряжения питания — (*direct current*, DC)] значение $t_{50\text{PH}}$ должно снижаться. Математическая модель $t_{50\text{PH}}$ имеет вид:

$$t_{50\text{PH}} = 86 \cdot 10^{-6} \cdot \exp \left[\frac{0,2}{8,617 \cdot 10^{-5}} \times \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{298} \right) \right] \cdot \exp \left(\frac{2,96}{RH_{\text{eff}}} \right). \quad (5)$$

Очевидно, что в (5) допущен ряд неточностей, а именно: константа $86 \cdot 10^{-6} \sim 8,617 \cdot 10^{-5}$, а $2,96 \sim 298/100$. Тогда (5) нужно представить как:

$$t_{50\text{PH}} = 8,617 \cdot 10^{-5} \cdot \exp \left[\frac{0,2}{8,617 \cdot 10^{-5}} \times \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{298} \right) \right] \cdot \exp \left(\frac{1}{100} \frac{298}{RH_{\text{eff}}} \right). \quad (6)$$

Перепишем (6) в более привычной форме:

$$t_{50\text{PH}} = R \frac{\exp \left(-\frac{E_A}{RT_0} \right)}{\exp \left(-\frac{E_{A_1}}{RT_A} \right)} \times \exp \left(\frac{1}{100} \frac{T_0}{RH_{\text{eff}}} \right), \quad (7)$$

где E_A — энергия активации, эВ; $R = 8,617 \cdot 10^{-5}$ — константа, эВ/°К; $T_0 = 298$ °К.

Т.к. $T_A > T_0$, то (5) удовлетворяет нашему предположению. В свою очередь, RH_{eff} рассчитывается по модели:

$$RH_{\text{eff}} = DC \cdot RH \exp \left[5230 \left(\frac{1}{T_J} - \frac{1}{T_C} \right) + (1 - DC) RH \right] \quad (8)$$

где T_J — температура кристалла, °К; T_C — температура поверхности корпуса, °К; константа 1 должна иметь размерность, В.

Значение RH определяется как $RH\% / 100$, где $RH\%$ — относительная влажность, %. Как известно, T_C зависит не только от T_A и P (мощности тепловыделения), но и способа установки микросхемы на испытательном стенде при электротермотренировке. Однако на практике обычно принимают $T_C \approx T_A$.

С учетом этого перепишем (8) в более понятном виде:

$$RH_{\text{eff}} = 1 \cdot RH + DC \cdot RH \left[\frac{\exp \left(-\frac{E_{A_2}}{RT_A} \right)}{\exp \left(-\frac{E_{A_2}}{RT_J} \right)} - 1 \right]. \quad (9)$$

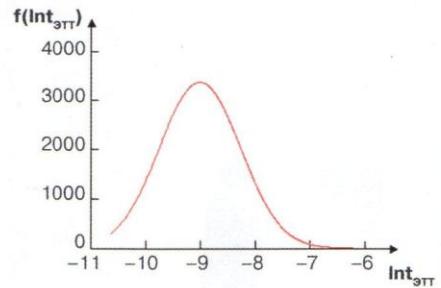


Рис. 2. Плотность вероятности логарифмически-нормального распределения (логарифмический масштаб)

$$M(t) = \exp \left[M(\ln t) + \frac{\sigma^2(\ln t)}{2} \right], \quad (11)$$

где M — математическое ожидание, то с учетом этого (3) должно быть представлено как:

$$\lambda_{\text{PH}} = \frac{1}{\sigma_{\text{PH}} \sqrt{2\pi t}} \times \exp \left\{ -\frac{\left[\ln t - \left(\ln t_{50\text{PH}} - \frac{\sigma_{\text{PH}}^2}{2} \right) \right]^2}{2\sigma_{\text{PH}}^2} \right\}. \quad (12)$$

Как видно, отношение экспонент в (9) меньше 1 (т.к. $T_A < T_J$), и при увеличении, например, DC, RH_{eff} уменьшается (а $t_{50\text{PH}}$ возрастает), что противоречит здравому смыслу. Видимо, в отличие от (5), в (9) допущена ошибка.

Кроме того, константа 5230 также не совсем точна, т.к. она получена для $E_A = 0,45$, эВ и $R = 8,6 \cdot 10^{-5}$, (а не $8,617 \cdot 10^{-5}$). С учетом этих замечаний (8) принимает вид:

$$RH_{\text{eff}} = DC \cdot RH \exp \left[-\frac{0,45}{8,617 \cdot 10^{-5}} \times \left(\frac{1}{T_J} - \frac{1}{T_A} \right) + (1 - DC) RH \right]. \quad (10)$$

И, наконец, теперь следует вернуться к (3). Дело в том, что, исходя из (5)...(10) $t_{50\text{PH}}$ должно интерпретироваться как математическое ожидание $M(t)$ случайной величины t , но никак не ее логарифма — $M(\ln t)$. Так как у логарифмически-нормального распределения $M(t)$ и $M(\ln t)$ связаны соотношением:

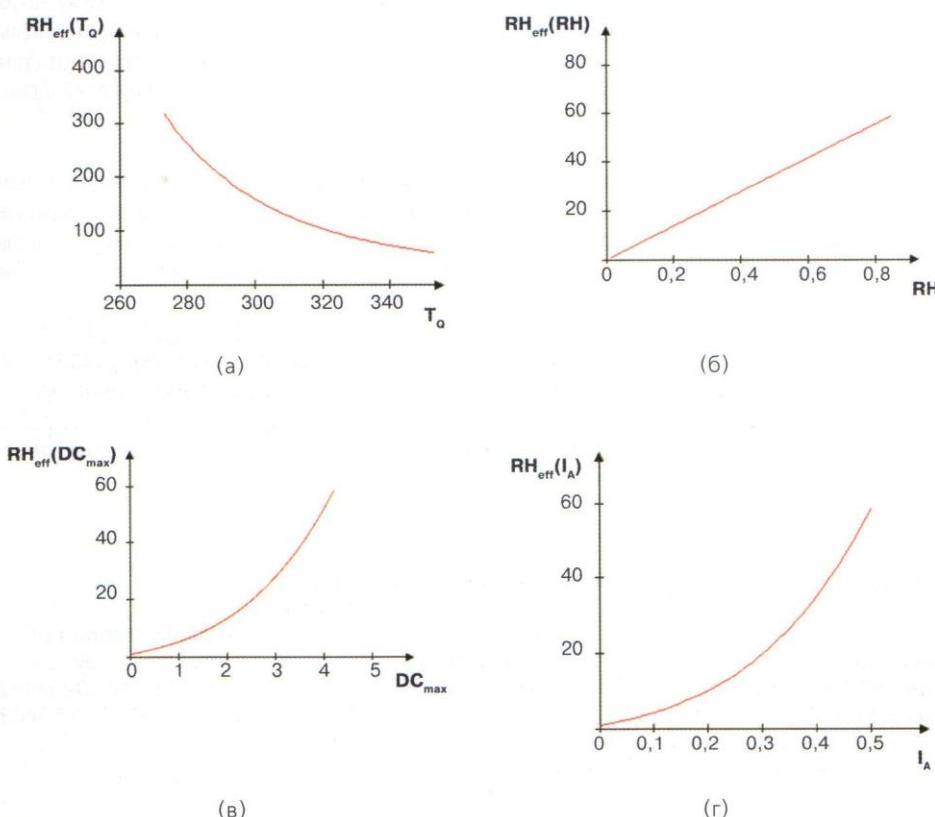
то из (13) следует, что при $v = const$ σ_{PH} также константа. Кроме того, (13) позволяет оценить принятное в Appendix B значение v . При $\sigma_{\text{PH}} = 0,74$ $v = 0,797$.

Таким образом, для расчета λ_{PH} следует использовать (10), (6) и (12), однако вопросы с размерностью в этих моделях так и не разрешены, поэтому остается только предположить, что в них опущены соответствующие «размерные» множители.

Сделав эти предварительные замечания, проведем расчет λ_{PH} для процессора C8051F305. Данные, необ-

Таблица 2. Исходные данные для расчета

№ п.п.	Обознач.	Наименование	Знач.	Ед. измер.	Примечание
1	2	3	4	5	6
Режим электротермотренировки					
1	T _A	Температура окружающей среды	353,0	°К	80,0 °C
2	RH%	Относительная влажность	85,0	%	RH = 0,85 отн. ед.
3	T _C	Температура корпуса	353,0	°К	T _C ≈ T _A
4	I _A	Рабочий ток	0,5	А	I _{max}
5	DC	Рабочее напряжение	4,2	В	DC _{max}
6	t _{эпт}	Время электротермотренировки	96,0	ч	4,0 дн.
Характеристики процессора					
7	I _{ном}	Номинальный рабочий ток	5,0 · 10 ⁻³	А	5,0 мА
8	I _{max}	Максимально допустимый рабочий ток	0,5	А	500,0 мА
9	DC _{ном}	Номинальное напряжение питания	3,6	В	
10	DC _{max}	Максимально допустимое напряжение питания	4,2	В	
11	QFN	Тип корпуса			Негерметич.
12	#Pins	Число выводов корпуса	11	Шт.	
13	θ _{JC}	Тепловое сопротивление кристалл-корпус	40	°К/Вт	40,0 °C/Вт
14	T _{max}	Максимально допустимая температура корпуса	358,0	°К	80,0 °C
15	π _{PT}	Package type factor	6,1	Отн. ед.	SMT по п. 5.3
16	π _{PT}	Package type	4,7	Отн. ед.	SMT по Appendix B
17	π _Q	Quality factor	0,25	Отн. ед.	Class S по п. 5.10
Условия эксплуатации					
18	t ₃	Время эксплуатации	8,76 · 10 ³	ч	2,0 г
19	t _{CC}	Срок службы	4,38 · 10 ⁴	ч	10,0 г
20	π _E	Environment factor	0,5	Отн. ед.	G _B по п. 5.10

Рис. 3. Зависимости RH_{eff} от: T_A (а), RH (б), DC (в) и I_A (г)

ходимые для расчета, получены на основе документации на процессор (*Data Sheet, Quality & reliability monitors report*), а также из нормативно-технической и справочной литературы и сведены в таблицу 2.

1. Вычисляем температуру кристалла — T_J:

$$T_J = T_c + \Theta_{JC} P, \text{ °K},$$

где Θ_{JC} — тепловое сопротивление кристалл-корпус, °К/Вт; P — рабочая мощность, Вт, P = I_A · DC.

При заданных значениях (см. табл. 2) T_J = 437 °K.

2. Вычисляем RH_{eff} по (10). При заданных значениях (см. табл. 2) RH_{eff} = 58,6. На рис. 3 приведены графики зависимости RH_{eff} от T_A, RH, DC и I_A.

На рис. 4 для примера приведена зависимость RH_{eff} от T_A и RH.

3. Вычисляем t_{50 PH} по (6). При заданных значениях (см. табл. 2), t_{50 PH} = 2,69 · 10⁻⁵. На рис. 5 приведены графики зависимости t_{50 PH} от T_A, RH, DC и I_A.

На рис. 6 для примера приведена зависимость t_{50 PH} от T_A и RH.

4. Вычисляем λ_{PH} по (12). При заданных значениях t = 9,6 · 10⁻⁵, t_{50 PH} = 2,69 · 10⁻⁵ и σ_{PH} = 0,74, λ_{PH} = 6,36 · 10². На рис. 7 приведен график плотности вероятности логарифмически-нормального распределения λ_{PH}(t) по (12), а на рисунке 8 — тот же график в логарифмическом масштабе.

Мода плотности вероятности логарифмически-нормального распределения равна 12 ч (M₀ = 1,2 · 10⁻⁵). Сравнивая значения M₀, t_{50 PH} и t, приходим к выводу, что условие (4) выполняется.

Однако просто подставлять значение λ_{PH} в (1) бессмысленно, видимо, ее значение в (12) также получено в 10⁶ ч, тогда λ_{PH} = 6,36 · 10⁻⁴. Сравнивая порядок слагаемых в (1), можно прийти к выводу, что множитель 10⁻⁶ должен относиться ко всей сумме в целом, т.е.:

$$\lambda_{PAC} = [(2,4 \cdot 10^{-3} + 1,85 \cdot 10^{-5} \#Pins) \times \pi_E \pi_{PT} + \lambda_{PH} 10^{-6}] \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}. \quad (14)$$

5. Вычисляем λ_{PAC} по (14). При заданных значениях (см. табл. 2) λ_{PAC} равна:

$$\lambda_{PAC} = 2,17 \cdot 10^{-9} 1/\text{ч}.$$

Для сравнения оценим интенсивность отказов корпуса (λ_{корп}) по модели

MIL-HDBK-217F (notice 1, п. 5.3).

Полная модель λ_p имеет вид:

$$\lambda_p = (\lambda_{BD}\pi_{MFG}\pi_T\pi_{CD} + \lambda_{BP}\pi_E\pi_Q\pi_{PT} + \lambda_{EOS}) \cdot 10^{-6}, \text{ 1/ч.} \quad (15)$$

где второе слагаемое характеризует интенсивность отказов корпуса; λ_{BP} — базовая интенсивность отказов корпуса.

λ_{BP} для микросхем в негерметичных корпусах определяется по модели:

$$\lambda_{BP} = 0,0022 + 1,72 \cdot 10^{-5} \# \text{Pins}. \quad (16)$$

В данном случае $\lambda_{BP} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$
Тогда:

$$\lambda_{корп} = (2,2 \cdot 10^{-3} + 1,72 \cdot 10^{-5} \# \text{Pins}) \times \pi_E \pi_Q \pi_{PT} \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.} \quad (17)$$

Как уже отмечалось выше, расчет λ_p по модели (15) реализован в «Системе расчета надежности составных частей» (СРН-СЧ) программного комплекса АСОНИКА-К (версия 4.0). Так, на рисунке 1 приведен скриншот Интерфейса пользователя СРН-СЧ ПК АСОНИКА-К с результатами расчета λ_p .

Как видно из рисунка 1, для $\pi_{PT} = 6,1$ (SMT, негерметичный) $\lambda_p = 6,9 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч.}$ Значение $\lambda_{корп}$ по (17) равно:

$$\lambda_{корп} = 1,82 \cdot 10^{-9}, \text{ 1/ч.}$$

Погрешность оценки $\lambda_{корп}$ по модели (17) составляет не более -15% , что вполне допустимо при инженерных расчетах. Однако полученный результат вызывает сомнения, т.к. (17) по отношению к (14) является более грубой моделью, т.е. она должна давать верхнюю оценку $\lambda_{PAC}(\lambda_{корп} \geq \lambda_{PAC})$, а не наоборот. Правда, если попробовать рассчитать λ_{PAC} для микросхем в герметичных корпусах, то можно обнаружить очередную неточность в Appendix B. Для микросхем в герметичных корпусах модель (14) остается неизменной, а $\lambda_{PH} = 0$ (*for hermetic package*). Так как значения коэффициента π_{PT} и в п. 5.3, и в Appendix B одинаковые, а различие только в λ_{BP} , то в (14) необходимо заменить первое слагаемое на (16), чтобы результаты расчетов λ_{PAC} по п. 5.3 и Appendix B совпадали. Тогда:

$$\lambda_{PAC} = [(2,2 \cdot 10^{-3} + 1,72 \cdot 10^{-5} \# \text{Pins}) \times \pi_E \pi_Q \pi_{PT} + \lambda_{PH} \cdot 10^{-6}] \cdot 10^{-6}, \text{ 1/ч.} \quad (18)$$

46 Тел.: (495) 741-7701 www.elcp.ru

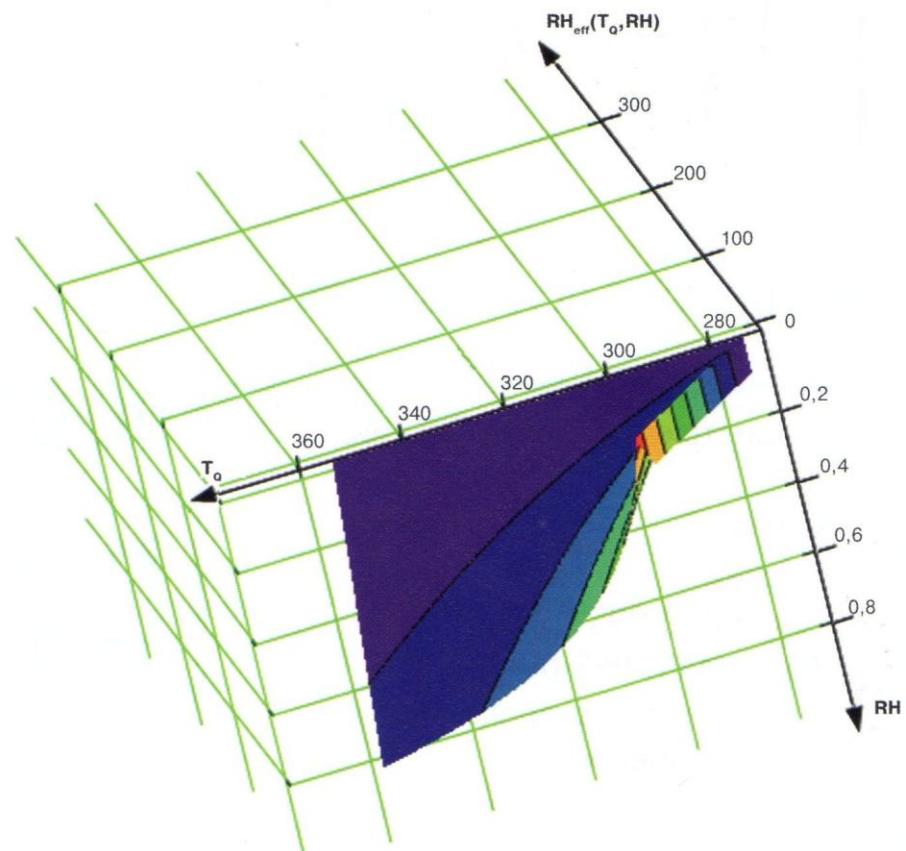


Рис. 4. Зависимость RH_{eff} от T_a и RH

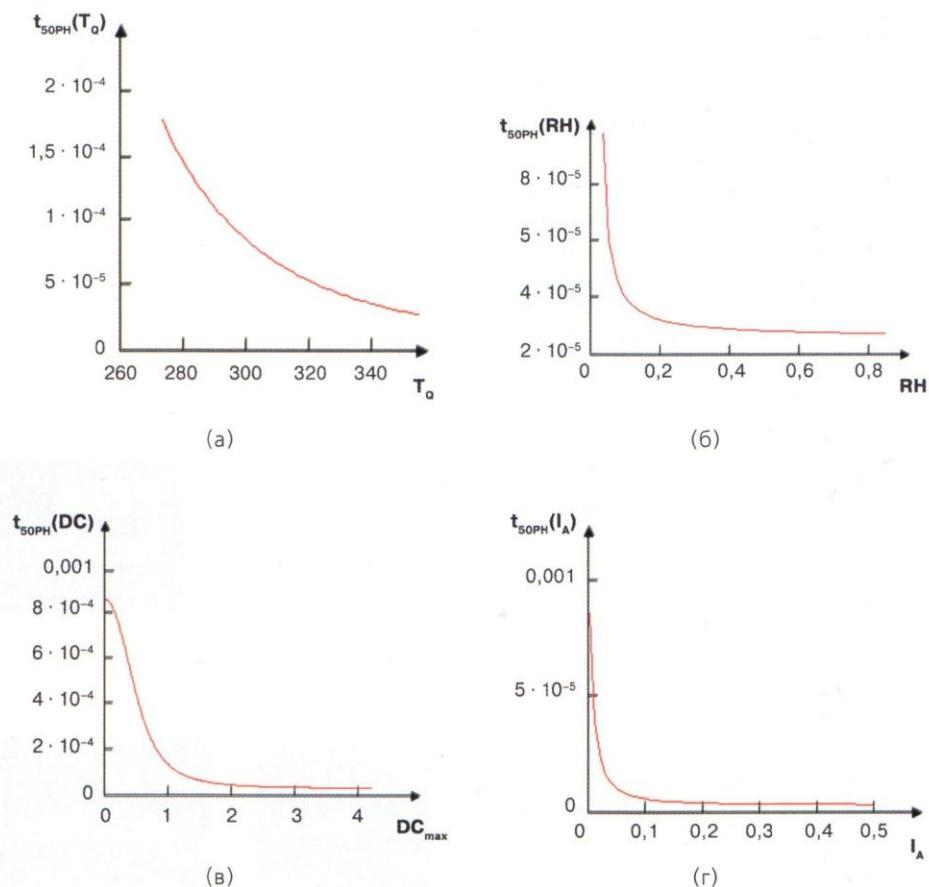
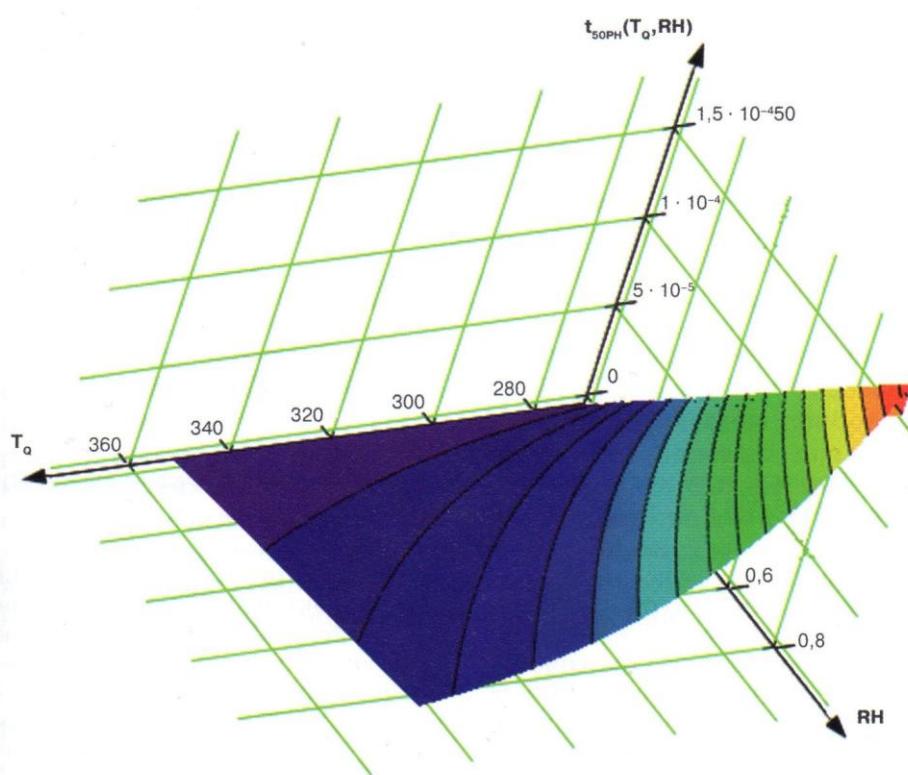
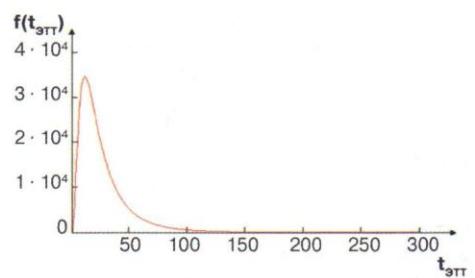


Рис. 5. Зависимости t_{50PH} от: T_a (а), RH (б), DC (в) и I_A (г)

Рис. 6. Зависимость $t_{50\text{PH}}$ от T_a и RH Рис. 7. Плотность вероятности логарифмически-нормального распределения по (12) для $t_{50\text{PH}} = 2,69 \cdot 10^{-5}$ и $\sigma_{\text{PH}} = 0,74$

При заданных значениях (см. табл. 2) λ_{PAC} по (18) равна:

$$\lambda_{\text{PAC}} = 2,04 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч.}$$

Хотя (как и следовало ожидать) погрешность оценки $\lambda_{\text{корп}}$ снизилась до -11% , но по-прежнему осталось, что $\lambda_{\text{корп}} < \lambda_{\text{PAC}}$, и эта погрешность будет возрастать (см. рис. 7) с уменьшением времени технологической электротермотренировки $t_{\text{этт}}$. Это следует иметь в виду при проведении расчетов надежности с использованием модели (15).

PS ELECTRO

ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

БЫСТРО - 14 ДНЕЙ

ОЧЕНЬ БЫСТРО - 7 ДНЕЙ

***Super* БЫСТРО - 2 ДНЯ**

И НЕДОРОГО - 4 НЕДЕЛИ ОТ 40РУБ./ДМ²

WWW.PSELECTRO.RU

Кроме рассмотренного выше расчета λ_{PAC} , расчеты остальных составляющих ($\lambda_{OX}(t)$, $\lambda_{MET}(t)$ и др.) и $\lambda_p(t)$ по методике Appendix B также реализованы в последней (4.1) версии СРН-СЧ ПК АСОНИКА-К. При этом все алгоритмы в Appendix B были проанализированы (аналогично алгоритму расчета λ_{PAC}) и, с учетом выявленных неточностей, исправлены. Впрочем, следует ожидать, что в новой (2006 г.) редакции справочника «Надежность ЭРИ» («Приложении» и, соответственно, версии АСРН) появится Appendix B или нечто ему подобное, тем более что исследования в этом направлении составителями справочника уже проведены. Однако до сих пор (март 2007 г.) справочник не издан, но как только он появится, пользователи смогут сравнить результаты ПК АСОНИКА-К и новой версии АСРН.

И в заключение отметим еще одно обстоятельство, связанное с применением Appendix B. Конечно, расчет эксплуатационной интенсивности отказов современных микросхем сам по себе имеет важное значение, но можно и решить обратную задачу: определить режимы и время электротермотренировки (T_A , RH%, DC и $t_{\text{этт}}$), при которых значение

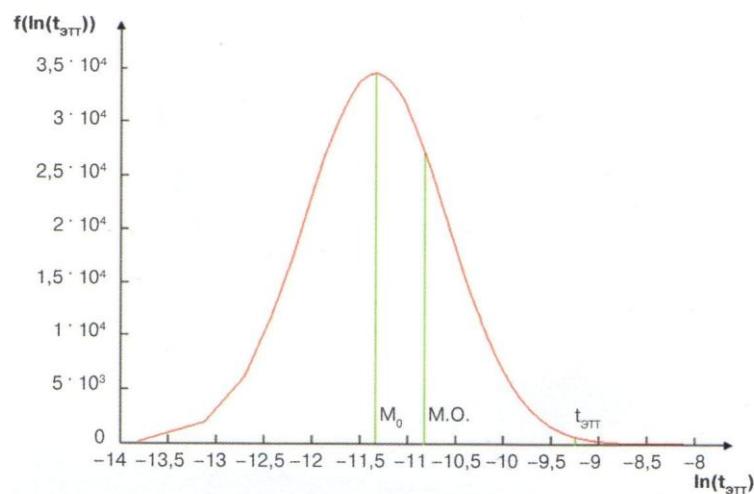


Рис. 8. Плотность вероятности логарифмически-нормального распределения по (12) для $t_{50_{PH}} = 2,69 \cdot 10^{-5}$ и $\sigma_{PH} = 0,74$ (логарифмический масштаб)

$\lambda_3(\lambda_p)$ будет не выше требуемого. Для этого в процедуру «Входного контроля» микросхем необходимо ввести операцию электротермотренировки. Тогда из партии (естественно, если микросхемы потенциаль- но обладают высокой надежностью) будут отобраны экземпляры, имеющие то значение λ_3 , которое обеспечит требуемый уровень надежности и микросхем, и изделия в целом, что особенно важно для аппаратуры

космической техники с длительными сроками активного существования (15 и более лет). При этом как разработчикам, так и изготовите- лям аппаратуры нужно ясно созна- вать, что такой «Входной контроль» отнюдь не гарантия реального уровня надежности микросхем.

ЛИТЕРАТУРА

1. MIL-HDBK-217F: Reliability prediction of electronic equipment.

ЗАО «НПО СЕРНИЯ» SERNIA

НА ЛЮБЫХ ЧАСТОТАХ

www.sernia.ru

ТЕЛ.: (495) 225 40 14,
www.sernia.ru,
office@sernia.ru

НИОКР
РАДИОИЗМЕРЕНИЯ
СИСТЕМНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ
САМОЕ СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

48 Тел.: (495) 741-7701 www.elcp.ru