



Кофанов Ю.Н., Стрельников В.П.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕГО РЕСУРСА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Представлены методики оценки средней наработки до отказа изделий электронной техники (MTTF) на основе использования DN-распределения для различных экспериментальных и справочных данных о надежности: интенсивности отказов, вероятности отказов, минимальной наработки, величины FIT. Отмечается, что прогнозные оценки MTTF на основе экспоненциального распределения завышены в 70-500 раз по сравнению с аналогичными оценками на основе DN-распределения.

Ключевые слова: надежность, квантиль, распределение наработки до отказа (ресурс), средняя наработка до отказа (MTTF).

Введение

При решении практически всех задач надежности используют определенные теоретические модели надежности (функции распределения наработки до отказа (на отказ)). В последние годы исследователи надежности техники используют решения разнообразных задач надежности, основанные на применении различных теоретических моделей надежности (экспоненциального, Вейбулла, логарифмически нормального, диффузионных [1] и других распределений [2, 3]), которые приводят к значительному расхождению получаемых результатов. Ниже приводятся результаты оценки (прогнозирование) средней наработки до отказа изделий электронной техники (ИЭТ) при использовании различных теоретических моделей отказов.

Оценка и прогнозирование средней наработки до отказа ИЭТ

Современная элементная база – это изделия электронной техники, обладающие достаточно высокой надежностью. В связи с этим, средняя наработка до отказа ИЭТ (Mean Time to Failure – MTTF) – характеристика, необходимая производителям ИЭТ, а также разработчикам технических систем, может быть оценена только параметрическим методом, то есть путем использования соответствующих теоретических моделей распределения наработки до отказа. Использование той или иной теоретической модели отказов предопределяет соответствующие методические погрешности при оценке MTTF. При этом надежность изделий электронной техники такова, что при испытаниях удается получить наработки, соответствующие экспериментальной вероятности отказов $F(t)=0,0001\dots 0,0005$, и на основании этих результатов прогнозировать среднее время до отказа данных изделий. Известно [4, 5], что прогнозирование среднего значения для квантилей указанного уровня вероятностей при использовании однопараметрического

экспоненциального закона приводит к завышению оценки на несколько порядков по сравнению с известными двухпараметрическими законами. Прогноз средней наработки до отказа ИЭТ на основе двухпараметрических распределений естественно является точнее.

Ниже приводятся результаты исследования и причины в расхождении прогнозируемых оценок МТТФ при использовании различных теоретических функций распределения наработки до отказа на примере интегральных микросхем (ИМС).

Для сокращения объема испытаний, с целью оценки надежности ИМС, ведущие производители электронных компонентов проводят ускоренные испытания, позволяющие получить оценки показателей надежности за время, значительно меньшее реальной долговечности ИМС. Основным способом сокращения продолжительности испытаний является форсирование режимов работы ИМС температурой, ускоряющей основные физико-химические процессы деградации электронных компонентов.

Коэффициент ускорения A_t в зависимости от температуры определяется исследователями, следуя закону Аррениуса:

$$A_t = \exp \left[-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_n} \right) \right],$$

где E_a – энергия активации (для ИМС $E_a = 0,7$ эВ); k – постоянная Больцмана ($k = 8,617 \cdot 10^{-5}$); T_f – температура, при которой проводились форсированные испытания (в К); T_n – рабочая температура компонентов (в К). Испытания ИМС на надежность при повышенной температуре, как правило, проводятся в соответствии со стандартом MIL-STD-883, метод 1005 [6].

В таблице 1 представлены коэффициенты ускорения в зависимости от температуры проведения форсированных испытаний, которыми пользуются специалисты [6,7], основываясь на выше указанных теоретических предпосылках. Однако экспериментального подтверждения этих данных нет, и получить их практически невозможно, поскольку получение статистических данных в нормальных условиях эксплуатации практически не реально.

Уровень надежности современных ИМС настолько высок, что даже форсированные испытания на надежность при повышенной температуре не позволяют определить показатели надежности некоторых типов ИМС. Поэтому оценка показателей надежности выполняется в обобщенной форме и показатели группируются по типам технологий или достаточно обширным классам ИМС. Таким образом, исходные данные по оценке показателей надежности (как правило, интенсивности отказов) включают как методические погрешности температурных пересчетов, так и влияние разных технологических процессов изготовления конкретных ИМС.

Прогнозирование МТТФ ИМС на основании результатов экспериментальной оценки интенсивности отказов

В качестве исходных данных использованы достаточно объемные результаты испытаний интегральных микросхем BiCMOS фирмы Analog Devices [7]. В [6] показано, что ИМС типа BiCMOS имеет показатель надежности FIT=5. Значение величины FIT было установлено на основании испытаний $N = 26980$ образцов, при этом произведение (ИМС)×(час)=EDH (приведенное полное время испытаний), то есть EDH = 2763317240 час, число отказов за время наблюдения $r = 12$. Необходимо вычислить среднюю наработку до отказа T_0 (МТТФ) этой ИМС.

Определяем усредненное время испытаний каждого образца: $\tilde{t}_n = \frac{EDH}{N} = 102420$ ч. Вычисляем экспериментальную интенсивность отказов: $\tilde{\lambda}(\tilde{t}_n) = \frac{FIT}{10^9} = 5 \cdot 10^{-9}$ 1/ч. Вычисляем вероятность отказа на момент $\tilde{t}_n$:

$$F(\tilde{t}_n) = \frac{r}{N} = 0,00044.$$

Поскольку статистических данных для оценки параметров формы двухпараметрических распределений нет, принимаем гипотезу о равенстве коэффициента вариации распределения наработки единице ($v = 1$), как у экспоненциального распределения. Заметим, что исследователи, использующие для решения задач надежности однопараметрическое экспоненциальное рас-

Таблица 1. Значения коэффициента ускорения в зависимости от температуры проведения форсированных испытаний

Температура испытаний ИМС, °С	Рабочая температура ИМС, °С	Коэффициент A_t
150	55	258
140	55	162
135	55	128
125	55	77
100	55	20

пределение, автоматически допускают, что коэффициент вариации распределения наработки до отказа (на отказ) равен единице. Далее, используя исходные данные ($\tilde{t}_n, \tilde{\lambda}(\tilde{t}_n), F(\tilde{t}_n)$) и различные теоретические функции распределения наработки до отказа (экспоненциальное (E), Вейбулла (W), логарифмически нормальное (LN), DN – и DM-распределение), получают прогнозные оценки МТТФ:

$$\text{Экспоненциальное распределение: } T_0^E = \frac{1}{\tilde{\lambda}(\tilde{t}_n)} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-9}} = 2 \cdot 10^8 \text{ ч} = \frac{200000000}{8760} \approx 22830 \text{ лет.}$$

Распределение Вейбулла: при коэффициенте вариации, равном единице,

$$T_0^W = T_0^E = 22830 \text{ лет.}$$

Логарифмически нормальное распределение:

а. Параметр формы σ логарифмически нормального распределения можно вычислить из следующего соотношения: $\sigma = \sqrt{\ln(v^2 + 1)} = \sqrt{\ln 2} = 0,833$.

б. Параметр масштаба a логарифмически нормального распределения вычисляют из соотношения для вероятности отказов:

$$\tilde{F}(\tilde{t}_n) = \Phi\left(\frac{\ln \tilde{t}_n - a}{\sigma}\right) = 0,00044;$$

здесь и далее $\Phi()$ – функция нормированного нормального распределения;

$$a = \ln \tilde{t}_n - \sigma U_{\tilde{t}_n} = \ln 102420 - 0,833 \cdot (-3,33) = 14,31.$$

в. Математическое ожидание наработки до отказа:

$$T_0^{LN} = \exp\left(a + \frac{\sigma^2}{2}\right) = \exp(14,657) =$$

$$= 2316168 \text{ ч} = \frac{2316168}{8760} = 264 \text{ лет.}$$

Диффузионное монотонное распределение (DM-распределение):

а. Параметр формы DM-распределения $v=1$.

б. Параметр масштаба μ DM-распределения вычисляют из соотношения для вероятности отказов:

$$\tilde{F}(\tilde{t}_n) = DM(t; \mu, v) = \Phi\left(\frac{\tilde{t}_n - \mu}{v \sqrt{\mu \tilde{t}_n}}\right) = 0,00044;$$

$$\mu = \tilde{t}_n \left(1 + \frac{v^2 U_{\tilde{t}_n}^2}{2} - v U_{\tilde{t}_n} \sqrt{1 + \frac{v^2 U_{\tilde{t}_n}^2}{4}}\right) =$$

$$= 102420 \left(1 + \frac{(-3,33)^2}{2} + 3,33 \sqrt{1 + \frac{(-3,33)^2}{4}}\right) = 1332694 \text{ ч.}$$

в. Математическое ожидание наработки до отказа:

$$T_0^{DM} = \mu \left(1 + \frac{v^2}{2}\right) = 1332694 \cdot 1,5 =$$

$$= 1999041 \text{ ч} = \frac{1999041}{8760} = 228 \text{ лет.}$$

Диффузионное немонотонное распределение (DN-распределение):

а. Параметр формы DN-распределения $v=1$.

б. Параметр масштаба μ DN-распределения вычисляют из соотношения для вероятности отказов:

$$\tilde{F}(\tilde{t}_n) = DN(t; \mu, v) = \Phi\left(\frac{\tilde{t}_n - \mu}{v \sqrt{\mu \tilde{t}_n}}\right) +$$

$$+ \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\tilde{t}_n + \mu}{v \sqrt{\mu \tilde{t}_n}}\right) = 0,00044;$$

$$\mu = \frac{\tilde{t}_n}{x(\tilde{F}(\tilde{t}_n); v)} = \frac{102420}{x(0,00044; 1)} = \frac{102420}{0,0699} =$$

$$= 1465236 \text{ ч.}$$

Значение $x(F; v)$ относительной наработки $x = \tilde{t}_n / \mu$ определяется из соответствующих таблиц DN-распределения по значениям F и v или из решения уравнения

$$\Phi\left(\frac{x-1}{v \sqrt{x}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{x+1}{v \sqrt{x}}\right) = F.$$

Математическое ожидание наработки до отказа по DN-распределению:

$$T_0^{DN} = \mu = 1465236 \text{ ч} = \frac{1465236}{8760} = 167 \text{ лет.}$$

Приведенный выше прогнозный расчет МТТФ исследуемой ИМС выполнен при допущении значения коэффициента вариации распределения наработок ИМС, равном единице ($v = 1$). Из опыта эксплуатации электронных систем представляется, что наиболее правильное значение коэффициента вариации наработок до отказа изделий электронной техники в режимах эксплуатации, в том числе ИМС, составит $v = 0,8$. Ниже в таблице 2 приводятся прогнозные оценки МТТФ исследуемой ИМС при гипотезе $v = 0,8$, которые рассчитаны аналогично предыдущему случаю.

Как видно из представленных данных, расхождение между прогнозными оценками МТТФ ИМС, заявленной надежности (FIT=5), например, между оценками на

Таблица 2. Прогнозируемые оценки МТТФ ИМС BiCMOS фирмы Analog Devices (в годах) по результатам форсированных испытаний

v	E	W	LN	DM	DN
1,0	22830	22830	264	228	167
0,8	22830	5275	155	128	115

основе экспоненциального и диффузионного немонотонного распределений составляет порядка 100-200 раз. Если выполнить аналогичные прогнозы для ИМС, имеющей надежность $FIT=1$, то расхождение прогнозных оценок МТТФ составит порядка 500 раз.

Механизм расхождения прогнозных оценок

Расхождение прогнозных оценок МТТФ ИМС, получаемых на основе одних и тех же экспериментальных оценок интенсивности отказов, определяется видом теоретического закона распределения наработки до отказа. На рис. 1 представлены теоретические кривые плотности распределения наработки $f(t)$ (штриховые линии) и интенсивности отказов $\lambda(t)$ (непрерывные линии), а также прогнозируемые значения средней наработки до отказа МТТФ, соответствующие экспериментальным данным для разных законов распределения (E, LN, DN).

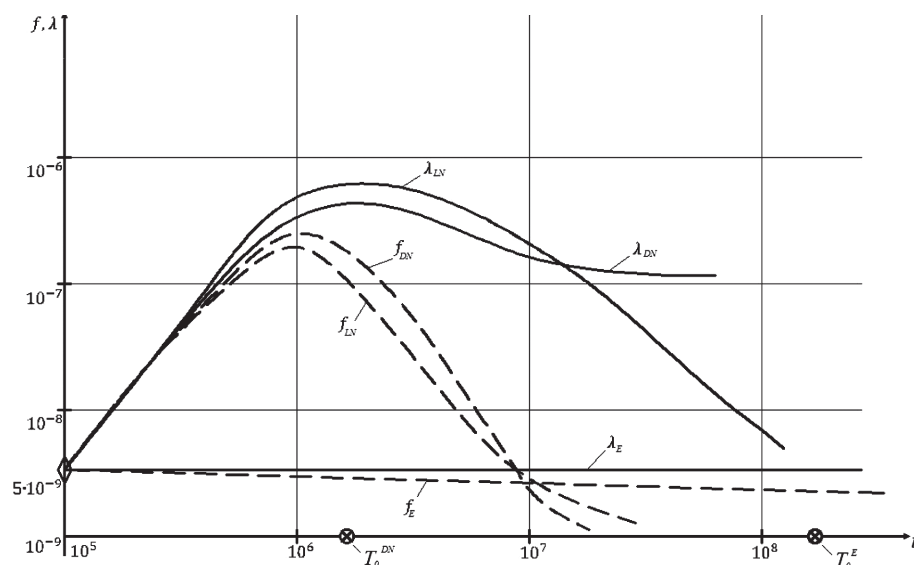


Рис. 1. Кривые прогнозируемых характеристик $\lambda(t)$ и $f(t)$

На рис. 1 обозначено: $f_E, f_{LN}, f_{DN}, \lambda_E, \lambda_{LN}, \lambda_{DN}$ – соответственно плотности и интенсивности отказов экспоненциального, логарифмически нормального и немонотонного диффузионного распределений. Как видно, интенсивность отказов $\lambda(t)$ и плотность распределения $f(t)$ двухпараметрических распределений на основном временном интервале весьма существенно (на несколько порядков) отличаются от этих характеристик по экспоненциальному распределению, хотя исходные значения на момент $\hat{t}_n$ совпадают. Это явление и обуславливает такое же существенное расхождение прогнозируемых значений МТТФ по различным законам распределений.

Таким образом [5, 8], в настоящее время при использовании экспоненциального закона завышается математическое ожидание времени до отказа (МТТФ)

изделий электронной техники в 50...500 и более раз по сравнению со значением этой же характеристики, вытекающей из двухпараметрических моделей, более адекватно описывающих статистику отказов.

Выводы

Экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы, получивший широкое распространение, часто не отражает реальные условия возникновения отказов электронной техники. Его применение приносит большой экономический ущерб, в первую очередь, потребителям изделий электронной техники, применяющих их в бортовом аэрокосмическом оборудовании и в других ответственных случаях.

Двухпараметрические диффузионные законы распределения, разработанные в Институте проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины, как показывают теоретические и экспериментальные исследования, дают наиболее адекватные

показатели надёжности изделий электронной техники [5, 8].

Литература

1. **Strelnikov V.** The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 1 // RAC Jorнал. – 2001, N 1. – P. 1 – 4; Part 2 // RAC Jorнал. – 2001, N 2. – P. 8 – 10.
2. **Кофанов Ю.Н.** Моделирование и обеспечение надёжности технических систем: Научное издание. – Москва: Энергоатомиздат, 2011, – 324 с.
3. **Кофанов Ю.Н.** Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности радиоэлектронных средств: Учебник для вузов. – Москва: Радио и связь, 1991. – 360 с.
4. **Шор Я.Б.** Статистические методы анализа и контроля качества и надёжности. – М.: Сов. радио, 1962. – 252 с.
5. **Стрельников В.П., Федухин А.В.** Оценка и прогнозирование надёжности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
6. **Романов В. А.** Количественная оценка надёжности интегральных микросхем по результатам форсированных испытаний // ЭКиС. – Киев: VD MAIS, 2003, №10. – С. 3-6.
7. Reliability and Quality Report. Fourth Quarter 1996. – Motorola, Inc., 1996.
8. **Грибов В.М., Кофанов Ю.Н., Стрельников В.П.** Оценивание и прогнозирование надёжности бортового аэрокосмического оборудования: Под отв. редакцией Ю.Н. Кофанова. – М.: НИУ ВШЭ, 2013. – 496 с.