

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ОТСУТСТВИИ ОТКАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

### Введение

Основным методом, который позволяет установить реальный уровень надежности объектов, представляется оценка показателей надежности объектов по результатам испытаний (эксплуатации). При этом достоверность оценки показателей надежности определяется объемом статистических данных об отказах, который обеспечивается соответствующим количеством образцов, поставленных на испытания или находящихся под наблюдением, а также продолжительностью испытаний (наблюдений).

На практике, как правило, имеет место ситуация, когда на испытания (наблюдения в процессе эксплуатации) может быть представлена малая выборка изделий, которая не обеспечивает достаточного объема статистических данных об отказах, позволяющего в рамках строго вероятностного подхода оценить искомые показатели надежности. Более того, распространенной представляется ситуация, когда в течение достаточно продолжительного времени вообще нет отказов. В настоящей работе решается задача оценки показателей надежности в данной ситуации.

Минимальное число образцов, на основании которых возможен статистический анализ с принятием решений относительно какого-либо одного параметра, не может быть менее 4 [1]. В противном случае неизбежно имеет место систематическая ошибка (смещение) оценки, что может привести к неправильному осмысливанию результатов.

Получение более достоверных оценок показателей надежности при испытании (наблюдении) малой выборки образцов может быть обеспечено при использовании дополнительной априорной информации. В частности, использование в качестве теоретических функций распределения наработки до отказа (на отказ) вероятностно-физических моделей отказов, например, применительно к электронным системам диффузионного немонотонного распределения (*DN*-распределения), рекомендованного стандартами [2-4], позволяет успешно решать поставленную задачу. В данном случае весьма важной является априорная информация об оценке коэффициента вариации распределения наработки.

### Оценка коэффициента вариации распределения наработки до отказа (предельного состояния) технических систем

Как известно, непосредственная экспериментальная оценка коэффициента вариации распределения отказов (распределения наработки до отказа) с заданной точностью требует статистических данных гораздо большего объема, чем для оценки средних показателей надежности, и поэтому, как правило, не представляется возможным получение необходимых данных. Установлено, что коэффициент вариации распределения отказов при диффузионном распределении совпадает с коэффициентом деградации (изменения определяющего параметра). Это предоставляет возможность оценки коэффициента вариации распределения отказов путем использования многочисленной информации о физических процессах деградации, обуславливающих отказы объектов. Коэффициент вариации как обобщенная характеристика является достаточно устойчивой характеристикой для типичных физических процессов деградации и в меньшей мере зависит от конструктивных тонкостей. Все это позволяет получать достаточно точные оценки коэффициентов вариации распределения отказов, используя информацию об аналогах. При этом аналогами являются не

только идентичные объекты, но и конструктивно отличающиеся объекты, имеющие аналогичные физические процессы деградации, приводящие к возникновению отказов.

В стандартах [2,3] приведены оценки коэффициентов вариации различных физических процессов, протекающих в объектах и приводящих к отказам. Приведенные данные представляют обобщение различных источников, результатов исследований процессов деградации, экспериментальных и эксплуатационных данных об отказах. Принятие численного значения коэффициента вариации из указанного диапазона в каждом конкретном случае диктуется соображениями общего характера: увеличение отношения нагрузки к пределу выносливости (прочности) относительно среднего статистического приводит к уменьшению коэффициента вариации и наоборот, то есть, чем меньше коэффициент нагружения, тем больше коэффициент вариации. Учитывая объем и число рассмотренных данных (выборок), на основании которых определены диапазоны коэффициентов вариации (десятки выборок), значение ожидаемого коэффициента вариации наработки до отказа (ресурса) практически всех изделий может быть установлено с достаточно высокой достоверностью (не менее 0,9).

Анализ отказов полупроводниковых приборов и интегральных схем показывает, что наибольшая доля отказов обусловлена явлениями усталости материалов вследствие циклических температурных, токовых и механических нагружений. Процессы усталости, как установлено, имеют коэффициенты вариации порядка 0,4 – 0,8. Часть отказов обусловлена другими процессами, в частности, связанными с протеканием электрического тока, накоплением зарядов, электродиффузией и другими, имеющими коэффициент вариации порядка 0,7 – 1,5. Таким образом, с учетом основных процессов деградации полупроводниковых приборов и интегральных схем оценка коэффициента вариации изделий электронной техники может находиться в интервале от 0,7 до 1,2.

В связи с высокой собственной надежностью элементов (изделий электронной техники) практически невозможно получить полную выборку отказов (выполнить план испытаний [NUN]) в нормальном режиме эксплуатации, на основании которой можно было бы определить коэффициент вариации. При отсутствии избыточности (резервирования) коэффициент вариации наработки объектов, состоящих из совокупности элементов, совпадает с коэффициентом вариации наработки до отказа этих элементов. Поэтому о коэффициенте вариации наработки элементов можно судить по значениям коэффициентов вариации наработки крупных радиоэлектронных блоков, статистика отказов которых имеется. Вышеуказанный диапазон значений коэффициента вариации изделий электронной техники не противоречит значениям коэффициентов вариации наработки радиоэлектронной аппаратуры.

Коэффициент вариации наработки до отказа и на отказ (повторные отказы) рассматриваемого объекта (системы) остается тем же самым, поскольку физический процесс деградации зависит от задействованных элементов и условий эксплуатации. При этом предполагается, что отказавшие элементы заменяются на идентичные, и сохраняется структура объекта (порядок избыточности). Если установлены превалирующие процессы разрушения и их доля (проценты) в формировании отказов, то ожидаемое среднее значение коэффициента вариации определяют по формуле

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^k p_i^2}},$$

где  $v_i, p_i$  – соответственно среднее значение коэффициента вариации и долевого вклад  $i$ -го процесса разрушения (объемная усталость, контактная усталость, механический износ и др.,  $i = 1, 2, \dots, k$ ). При этом

$$\sum_{i=1}^k p_i = 1.$$

**Оценка показателей надежности по результатам испытаний (эксплуатации) группы однотипных изделий при отсутствии отказов**

В случае, когда на момент контроля (цензурирования)  $t_u$  группа идентичных образцов ( $N \geq 4$ ) не имела отказов, параметр формы  $V$  ( $\bar{V}, \underline{V}, \bar{V}$ ) определяют согласно вышеприведенным рекомендациям.

Вычисляют нижнюю границу вероятности отсутствия отказа испытываемого образца за интервал испытаний (эксплуатации)  $t_u$ , если на испытании (эксплуатации) находилось  $N$  образцов и отказ не зафиксирован, по формуле [5]

$$\underline{P}(t_u) = \left( \frac{1-q}{2} \right)^{1/N}, \quad (1)$$

где  $q$  – доверительная вероятность, соответствующая двустороннему доверительному интервалу.

Вычисляют нижнюю доверительную границу параметра масштаба  $\mu$  DN-распределения для рассматриваемой схемы испытаний (эксплуатации), решая уравнение

$$\underline{P}(t_u) = \Phi\left(\frac{\mu - t_u}{v\sqrt{\mu t_u}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + t_u}{\bar{v}\sqrt{\mu t_u}}\right), \quad (2)$$

где  $\Phi(\cdot)$  – функция нормированного нормального распределения.

При установленных значениях  $\underline{P}(t_u)$  и  $\bar{V}$  из последнего уравнения получают решение (оценку нижней доверительной границы параметра  $\mu$ ) в следующем виде:

$$\underline{\mu} = \frac{t_u}{x [1 - \underline{P}(t_u); \bar{V}]}, \quad (3)$$

где  $x [1 - \underline{P}(t_u); \bar{V}]$  – относительная наработка  $\left(x = \frac{t_u}{\underline{\mu}}\right)$  определяется из таблиц функции DN –

распределения по значениям  $F = 1 - \underline{P}(t_u)$  и  $\bar{V}$  или решая уравнение

$$F = \Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+x}{\bar{v}\sqrt{x}}\right). \quad (4)$$

Введем обозначение:  $K_1^*(\underline{P}, \bar{V}) = \frac{1}{x [1 - \underline{P}(t_u); \bar{V}]}$  – поправочный коэффициент, учитывающий эмпирическую вероятность отсутствия отказа.

Используя оценку  $\underline{\mu}$ , соответствующую доверительной вероятности  $q$ , и информацию о средней оценке коэффициента вариации  $\tilde{\nu}$ , определяют точечную оценку параметра  $\tilde{\mu}$   $DN$ -распределения, решая следующее уравнение относительно  $\tilde{\mu}$ :

$$\Phi\left(\frac{\tilde{\mu} - \underline{\mu}}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \underline{\mu}}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu} + \underline{\mu}}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \underline{\mu}}}\right) = q. \quad (5)$$

Решением уравнения (5) относительно  $\tilde{\mu}$  является следующее выражение:

$$\tilde{\mu} = \frac{\underline{\mu}}{x(1-q; \tilde{\nu})}. \quad (6)$$

Введем обозначение:  $K_2^*(q, \tilde{\nu}) = \frac{1}{x(1-q; \tilde{\nu})}$  – поправочный коэффициент, учитывающий распределение наработки. С учетом введенного обозначения точечная оценка параметра масштаба  $DN$  – распределения имеет вид

$$\tilde{\mu} = t_u K_1^*(P, \bar{\nu}) K_2^*(q, \tilde{\nu}). \quad (7)$$

Оценку верхней доверительной границы параметра масштаба  $\bar{\mu}$  вычисляют по формуле

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} x(q; \tilde{\nu}) = \tilde{\mu} \bar{K}_2^*(q, \tilde{\nu}), \quad (8)$$

где введено обозначение:  $\bar{K}_2^*(q, \tilde{\nu}) = x(q; \tilde{\nu})$  – второй поправочный коэффициент, учитывающий распределение наработки и доверительную вероятность оценки показателей надежности.

Определив оценки параметров  $(\tilde{\mu}, \underline{\mu}, \bar{\mu}, \tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$   $DN$ -распределения, можно вычислить все необходимые показатели надежности [4].

Ниже в таблице 1 приведены выражения для основных точечных и граничных оценок показателей надежности (НДГ – нижняя доверительная граница, ВДГ – верхняя доверительная граница).

Таблица 1. Формулы для вычисления показателей надежности

Оценки	Средняя наработка	Гамма-процентная наработка до отказа	Вероятность безотказной работы за наработку $t$
Точечная оценка	$\tilde{\mu}$	$\tilde{\mu} x(1-\gamma; \tilde{\nu})$	$\Phi\left(\frac{\tilde{\mu} - t}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu} + t}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} t}}\right)$

НДГ уровня $q$	$\underline{\mu}$	$\underline{\mu} x(1-\gamma; \bar{\nu})$	$\Phi\left(\frac{\underline{\mu}-t}{\bar{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right) \cdot \exp\left(\frac{2}{\bar{\nu}^2}\right) \Phi\left(-\frac{\underline{\mu}+t}{\bar{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right)$
ВДГ уровня $q$	$\bar{\mu}$	$\bar{\mu} x(1-\gamma; \underline{\nu})$	$\Phi\left(\frac{\bar{\mu}-t}{\underline{\nu}\sqrt{\bar{\mu}t}}\right) \cdot \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right) \Phi\left(-\frac{\bar{\mu}+t}{\underline{\nu}\sqrt{\bar{\mu}t}}\right)$

**Пример.** С целью демонстрации методики и оценки адекватности метода решим типовую задачу. Поскольку в приводимом ниже примере конечные результаты известны, это дает основание для оценки точности прогнозирования по предлагаемому методу.

В качестве исходной информации используются известные результаты испытаний объектов (образцов из сплава В-95) при нагружении, обуславливающие процесс многоциклового усталости. Полный вариационный ряд и статистические характеристики (среднее и коэффициент вариации) приведены в стандарте [2] в Приложении Б (Выборка №4). Объем выборки  $N=463$ . Среднее выборочное значение  $S = 169040$  цикл. Коэффициент вариации  $V = 0,56$ . Первый член выборки  $t_1 = 44000$  цикл., последний член –  $t_{463} = 690000$  цикл.

*Постановка задачи.* Необходимо с доверительной вероятностью  $q = 0,9$  определить показатели надежности, в частности, среднее значение ресурса и гамма-процентный ресурс уровня  $\gamma = 0,95$  при следующих условиях:  $t_u = 20000$  цикл.; отказов нет; приняты известными значения коэффициента вариации:  $\underline{\nu} = 0,4$ ;  $\bar{\nu} = 0,5$ ;  $\bar{\nu} = 0,6$ .

*Решение задачи.*

1. Вычисляем статистику  $\underline{P} = \left(\frac{1-q}{2}\right)^{1/N} = (0,05)^{1/463} = 0,994$ .

2. Вычисляем коэффициент пересчета  $K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu})$ :

$$K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu}) = \frac{1}{x[1-\underline{P}(t_u); \bar{\nu}]} = \frac{1}{x(0,006; 0,6)} = \frac{1}{0,227} = 4,41.$$

3. Вычисляем коэффициент пересчета  $K_2^*(q, \bar{\nu})$ :

$$K_2^*(q, \bar{\nu}) = \frac{1}{x(1-q; \bar{\nu})} = \frac{1}{x(0,1; 0,5)} = \frac{1}{0,486} = 2,1.$$

4. Вычисляем поправочный коэффициент пересчета  $\bar{K}_2^*(q, \bar{\nu})$ :

$$\bar{K}_2^*(q, \bar{\nu}) = x(q; \bar{\nu}) = x(0,9; 0,5) = 1,653.$$

5. Вычисляем оценки параметра масштаба  $DN$ -распределения:

$$\tilde{\mu} = t_u K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu}) K_2^*(q, \bar{\nu}) = 20000 \cdot 4,41 \cdot 2,1 = 185220;$$

$$\underline{\mu} = t_u K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu}) = 20000 \cdot 4,41 = 88200; \quad \bar{\mu} = \tilde{\mu} \bar{K}_2^*(q, \bar{\nu}) = 185220 \cdot 1,653 = 306168.$$

6. Вычисляем оценки среднего (прогнозируемого) значения ресурса:

$$\tilde{T}_{cp} = \tilde{\mu} = 185220 \text{ цикл.}; \quad \underline{T}_{cp} = \underline{\mu} = 88200 \text{ цикл.}; \quad \bar{T}_{cp} = \bar{\mu} = 306168 \text{ цикл.}$$

7. Вычисляем оценки гамма-процентного (прогнозируемого) ресурса:

$$\tilde{T}_\gamma = \tilde{\mu} x (1 - \gamma; \tilde{\nu}) = 185220 \cdot x(0,05; 0,5) = 185220 \cdot 0,413 = 76496 \text{ цикл.};$$

$$\underline{T}_\gamma = \underline{\mu} x (1 - \gamma; \underline{\nu}) = 88200 \cdot x(0,05; 0,6) = 88200 \cdot 0,347 = 30605 \text{ цикл.};$$

$$\overline{T}_\gamma = \overline{\mu} x (1 - \gamma; \overline{\nu}) = 306168 \cdot x(0,05; 0,4) = 306168 \cdot 0,493 = 150956 \text{ цикл.}$$

Реальные характеристики рассматриваемой выборки следующие: среднее значение ресурса  $T_{cp} = 169040$  цикл., гамма-процентный ресурс  $T_\gamma = 67000$  цикл. Оценим погрешности вычисленных (прогнозируемых) показателей:

$$\delta_{T_{cp}} = \frac{|T_{cp} - \tilde{T}_{cp}|}{T_{cp}} = 0,1; \quad \delta_{T_\gamma} = \frac{|T_\gamma - \tilde{T}_\gamma|}{T_\gamma} = 0,14.$$

Теперь решим задачу оценки средней наработки до отказа испытываемых образцов при условии, что испытания продолжались до появления первого отказа, т.е.  $t_u = 44000$  цикл. Принимаются прежние оценки ожидаемого коэффициента вариации. В этом случае, используя метод квантилей [4], вычисляем параметр масштаба  $\tilde{\mu}$  и среднюю наработку до отказа:

$$\tilde{T}_{cp} = \tilde{\mu} = t_u [x(1/N; \tilde{\nu})]^{-1} = 44000 / x(0,002; 0,5) = 44000 / 0,236 = 186440 \text{ цикл.}$$

Как видно, при отсутствии или наличии отказов оценки практически совпадают.

## Выводы

Предложен метод прогнозирования надёжности при безотказных испытаниях (эксплуатации) изделий с учетом априорной информации о коэффициенте вариации ожидаемой наработки на основе  $DN$ -распределения. Для приведенного реального случая и принятых условий задачи предлагаемый метод даёт достаточно точные прогнозируемые оценки показателей надёжности при отсутствии отказов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фишер Р. Статистические методы для исследователей. – М.: Гостехиздат, 1958. – 396 с.
2. ГОСТ 27.005-97. Надёжность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – К.: Изд-во стандартов. – 43 с.
3. ДСТУ 2862-94. Надёжность техники. Методы расчета показателей надёжности. Общие требования. – Введ. 01.01.96. – К.: Изд-во стандартов. – 39 с.
4. ДСТУ 3004-95. Надёжность техники. Методы оценки показателей надёжности по экспериментальным данным. – Введ. 01.01.96. – К.: Изд-во стандартов. – 122 с.
5. Надёжность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. / Ред. Совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 6. – 376 с.