



УДК 621.192 (035)

Н.Н. ИВАНОВ, В.П. СТРЕЛЬНИКОВ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПАЯНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ

Анотація. Представлена методика оцінки залишкової довговічності паяних з'єднань за результатами тривалої експлуатації на основі використання дифузійного немоного розподілу.

Ключові слова: відмова, довговічність, розподіл довговічності, залишковий ресурс.

Аннотация. Представлена методика оценки остаточной долговечности паяных соединений по результатам длительной эксплуатации на основе использования диффузионного немоного распределения.

Ключевые слова: отказ, долговечность, распределение долговечности, остаточный ресурс.

Abstract. The residual life of braze joints assessing method on the results of long-term operation using non-monotonic diffusion distribution was represented.

Keywords: failure, durability, distribution longevity, remaining life expectancy.

1. Основные положения

Задача прогнозирования остаточного ресурса (долговечности) паяных соединений как невосстанавливаемых компонент изделий электронной техники имеет важное значение для более эффективного использования разрабатываемой электронной аппаратуры. Для невосстанавливаемых объектов определения ресурс и долговечность представляют наработку до отказа (до предельного состояния). Под остаточной долговечностью паяных соединений (после некоторого момента времени τ), если к этому моменту не было отказа, понимается наработка, начиная с момента τ до возникновения отказа паяных соединений при установленных режимах применения и условиях эксплуатации.

В качестве основных показателей остаточного ресурса принято [1] рассматривать следующие:

– средний остаточный ресурс $\pi(\tau)$, определяемый как математическое ожидание остаточного ресурса после наработки τ ;

– гамма-процентный остаточный ресурс $\pi_\gamma(\tau)$, определяемый как наработка, начиная с некоторого момента наработки τ , в течение которого безотказно проработавший объект будет иметь значение условной вероятности безотказной работы уровня γ :

$$\gamma = \frac{P(\tau + \pi_\gamma(\tau))}{P(\tau)}.$$

Если известна первоначальная функция распределения ресурса (долговечности) исследуемых объектов $F(t)$, то можно определить выражения для всех упомянутых выше характеристик остаточного ресурса (долговечности). Соответствующими стандартами [3, 4], а также целым рядом работ [2, 5] рекомендуется использовать в качестве теоретической модели распределения отказов изделий электронной техники диффузионное немоного распределение (DN -распределение). Полагаем, что первоначальная функция распределения долговечности паяных соединений описывается DN -распределением вида

$$F(t) = DN(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{t + \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right), \quad (1)$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция нормированного нормального распределения, μ – параметр масштаба распределения, значение которого совпадает со средней наработкой до отказа, ν – параметр формы распределения, значение которого совпадает с коэффициентом вариации наработки.

Известно [6], что для функции распределения (1) математическое ожидание остаточного ресурса имеет выражение:

$$\pi(\tau) = \frac{(\mu - \tau)\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right) + (\mu + \tau)\exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right)}. \quad (2)$$

Выражение для гамма-процентного остаточного ресурса, соответствующее (1), имеет следующий вид:

$$\pi_\gamma(\tau) = \mu \cdot x(1 - \gamma^*; \nu) - \tau, \quad (3)$$

где $\gamma^* = \gamma \left[\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right) \right]$, $x(1 - \gamma^*; \nu)$ определяют по значениям

$F = 1 - \gamma^*$ и ν из таблиц DN -распределения или из решения следующего уравнения

$$1 - \gamma^* = \Phi\left(\frac{x - 1}{\nu\sqrt{x}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{x + 1}{\nu\sqrt{x}}\right).$$

2. Оценка долговечности паяных соединений по результатам эксплуатации

Постановка задачи. Электронная система с известным количеством паяных соединений $N = 25000$ шт. находится в эксплуатации 3 года ($t_u = 26820$ ч). За это время не было ни одного отказа. Необходимо определить: 1) среднюю долговечность эксплуатируемых паяных соединений; 2) среднюю остаточную долговечность после эксплуатации $\tau = t_u$; 3) гамма-процентную остаточную долговечность для $\gamma = 0,95$.

Чтобы решить поставленные задачи, необходимо определить параметры (μ, ν) DN -распределения наработки до отказа исследуемых паяных соединений.

Определение параметра формы ν

Исследованиями установлено, основными процессами деградации паяных соединений, приводящих к отказам, их долевое распределение (P_i) и значения коэффициентов вариации (V_i) являются:

- образование интерметаллидов – $P_1 = 0,35$ (35%), $V_1 = 0,7$;
- диффузия примесей – $P_2 = 0,25$ (25%), $V_2 = 0,5$;
- электрохимическая коррозия – $P_3 = 0,15$ (15%), $V_3 = 1,1$;
- окисление – $P_4 = 0,1$ (10%), $V_4 = 0,7$;
- усталость многоцикловая – $P_5 = 0,1$ (10%), $V_5 = 0,6$;
- ползучесть припоя – $P_6 = 0,05$ (5%), $V_6 = 0,4$.

Исходя из этого, учитывая относительный вклад процессов деградации [2], принимают следующую оценку коэффициента вариации:

$$\tilde{\nu} = \sqrt{\frac{\sum_i^6 V_i^2 P_i^2}{\sum_i^6 P_i^2}} = 0,766.$$

Для решения поставленных задач, на основании полученной средней оценки $\tilde{\nu}$, принимаем следующие граничные оценки параметра формы: $\underline{\nu} = 0,5$; $\bar{\nu} = 1,0$.

Определение параметра масштаба μ

Определяют эмпирическую вероятность отказа исследуемых паяных соединений $F(t_u)$ за интервал эксплуатации $t_u = 3$ года. Используя известную функцию Клоппера-Пирсона [1], для безотказных испытаний по биномиальной схеме, вычисляется γ – нижняя граница \underline{P} для P (вероятности отсутствия отказа). Принято $\gamma = 0,9$:

$$\underline{P} = (1 - \gamma)^{\frac{1}{N}} = (0,1)^{1/25000} = 0,9999.$$

Следовательно, эмпирическая вероятность отказа исследуемой группы паяных соединений $F(t_u) = 1 - 0,9999 = 0,0001$.

Вычисление оценок параметра масштаба DN -распределения ($\underline{\mu}$, $\tilde{\mu}$).

Приравнявая эмпирическое значение нижней границы вероятности отсутствия отказа $\underline{P}(t_u)$ теоретическому, получают уравнение для оценки параметра $\underline{\mu}$:

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

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

$$\underline{\mu} = \frac{t_u}{x[F(t_u); \bar{\nu}]}.$$

Значение величины $x(F; \nu)$, представляющей собой относительную наработку при немонотонном диффузионном распределении для вероятности отказа F при коэффициенте вариации наработки ν определяют по таблицам DN -распределения. Если необходимые значения F и ν в таблицах отсутствуют, то значение $x(F; \nu)$ определяют, решая уравнение

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

Вычисление оценки $\underline{\mu}$:

$$\underline{\mu} = \frac{t_u}{x[F(t_u); \bar{\nu}]} = \frac{26820}{x(0,0001; 1,0)} = \frac{26820}{0,0589} = 455348 \text{ ч.}$$

Вычисление оценки $\tilde{\mu}$.

Используя оценку $\underline{\mu}$ и информацию о количестве испытываемых (наблюдаемых) образцов N , получают выборочную среднюю оценку параметра $\tilde{\mu}$ DN -распределения по формуле [2]:

$$\tilde{\mu} = \frac{\underline{\mu}}{x(1-q; \tilde{\nu}/\sqrt{N})},$$

где q – двусторонняя доверительная вероятность оценки параметра (принимаяем $q = 0,9$), остальные обозначения прежние.

$$\text{Вычисляем } \tilde{\mu}: \tilde{\mu} = \frac{\underline{\mu}}{x(1-q; \tilde{\nu}/\sqrt{N})} = \frac{455348}{x(0,1; 0,004)} = \frac{455348}{0,99} = 459950 \text{ ч.}$$

Таким образом, средняя долговечность исследуемых паяных соединений $\tilde{T} = \tilde{\mu} \cong 52,5$ лет.

3. Определение показателей остаточной долговечности исследуемых паяных соединений

Вычисляем среднюю остаточную долговечность исследуемых паяных соединений по формуле (2) в годах:

$$\pi(\tau) = \frac{(52,5 - 3)\Phi\left(\frac{52,5 - 3}{0,766\sqrt{52,5 \cdot 3}}\right) + (52,5 + 3)\exp\left(\frac{2}{0,766^2}\right)\Phi\left(-\frac{52,5 + 3}{0,766\sqrt{52,5 \cdot 3}}\right)}{\Phi\left(\frac{52,5 - 3}{0,766\sqrt{52,5 \cdot 3}}\right) - \exp\left(\frac{2}{0,766^2}\right)\Phi\left(-\frac{52,5 + 3}{0,766\sqrt{52,5 \cdot 3}}\right)} \cong 49,5 \text{ лет.}$$

Вычисляем гамма-процентную остаточную долговечность для $\gamma = 0,95$, используя формулу (3) (в данном случае $\gamma^* \cong \gamma$):

$$\pi_{\gamma}(\tau) = \mu \cdot x(1 - \gamma^*; \nu) - \tau = 52,5 \cdot x(0,05; 0,766) - 3 = 52,5 \cdot 0,269 - 3 = 11,12 \text{ лет.}$$

4. Заключение

Применение диффузионного немонотонного распределения в качестве модели распределения долговечности паяных соединений позволяет, используя дополнительную априорную информацию о процессах деградации паяных соединений, оценить долговечность, а также остаточную долговечность на любой фиксированный момент эксплуатации даже при отсутствии отказов за время наблюдений (эксплуатации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность и эффективность в технике: справочник в 10 т. / Под ред. В.С. Авдеевского и др. – М.: Машиностроение, 1989. – Т.6. – 376 с.
2. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
3. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – 43 с.
4. ДСТУ 2992-95. Изделия электронной техники. Методы расчета надежности. – Введ. 01.01.96. – 76 с.
5. Погребинский С.Б. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ / С.Б. Погребинский, В.П. Стрельников. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
6. Стрельников В.П. Прогнозирование остаточного ресурса изделий электронной техники / В.П. Стрельников // Математичні машини і системи. – 2000. – № 2, 3. – С. 163 – 169.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2012