

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ**

---

**Abstract:** It is offered the method of residual resource of electronic devices forecasting after long storage on the basis of DN-distribution of MTTF.

**Key words:** MTTF, residual resource, storage time.

**Анотація:** Запропоновано метод прогнозування залишкового ресурсу електронних пристроїв після тривалого зберігання на основі DN-розподілу наробітку до відмови.

**Ключові слова:** середній наробіток до відмови, залишковий ресурс, час зберігання.

**Аннотация:** Предлагается метод прогнозирования остаточного ресурса электронных устройств после длительного хранения на основе DN-распределения наработки до отказа.

**Ключевые слова:** средняя наработка до отказа, остаточный ресурс, время хранения.

### **1. Введение**

Необходимость в оценке надежности изделий после длительного хранения возникает в тех случаях, когда оборудование было законсервировано и после расконсервации вводится в эксплуатацию. Данная ситуация наиболее часто встречается в военной области, где получение достоверной информации о надежности расконсервированного оборудования приобретает большое значение.

### **2. Постановка задачи исследований**

Объектом исследований является электронное устройство, состоящее из изделий электронной техники (ИЭТ) (полупроводниковых приборов и интегральных микросхем) и других электро-радиоизделий (ЭРИ) (резисторов, конденсаторов и т.п.), которое хранилось в течение времени  $\tau$  при среднегодовой температуре  $t^0C$ . Необходимо оценить величину остаточного ресурса устройства  $R(T_{сл})$  после введения его в эксплуатацию.

### **3. Учет влияния режима хранения на надежность элементов**

Отсутствие электрической нагрузки и пониженная температура хранения благотворно влияют на среднюю скорость деградации изделия. В режиме хранения она ниже скорости деградации изделия при его нормальной эксплуатации за счет снижения скоростей составных процессов деградации и отсутствия ряда составных процессов деградации, связанных с электрической нагрузкой.

Например, для полупроводниковых приборов в режиме хранения отсутствуют такие составные процессы деградации, как электромиграция, локализация тока в областях микродефектов в кристалле, усталостные разрушения кристалла и элементов конструкции, связанные с импульсным электрическим режимом, накопление зарядов на поверхности кристалла, электрохимическая коррозия и т.д. На долю отказов, связанных с данными процессами деградации в режимах эксплуатации, приходится порядка 50% от общего количества отказов.

Для учета влияния режима хранения на надежность элемента воспользуемся известным подходом, основанным на корректировке интенсивности отказов изделия:

$$\lambda_{xp}(t_H) = \lambda_0(t_H)K_1, \quad (1)$$

где  $\lambda_{xp}(t_H)$  – интенсивность отказов элемента в режиме хранения на момент времени  $t_H$ ;  $\lambda_0(t_H)$  – интенсивность отказов элемента в нормальном режиме эксплуатации на момент времени  $t_H$ ;  $K_1$  – поправочный коэффициент к интенсивности отказов для режима хранения.

Для определения поправочного коэффициента  $K_1$  можно воспользоваться экспериментальными данными, представленными в виде таблиц и номограмм [1]. Например, для некоторого элемента определяем  $K_1=0,2$  при температуре  $t=10^0\text{C}$  и коэффициенте электрической нагрузки  $K_{эH}=0$ . Если  $\lambda_0(t_H) = 0,05 \cdot 10^{-6}$  1/ч при  $t_H = 25000$  ч, то интенсивность в режиме хранения равна

$$\lambda_{xp}(t_H) = \lambda_0(t_H)K_1 = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Процедура оценки средней наработки до отказа элемента ( $t$ ) базируется на гипотезе о  $DN$ -распределении отказов. Исходными данными для оценки средней наработки до отказа являются значения интенсивностей отказов  $\lambda(t_H)$  и величина наработки, которой она соответствует  $t_H$ . Для вычисления  $t$  необходимо численным методом решить уравнение для интенсивности отказов

$$\lambda(t_H) = \frac{f(t_H)}{R(t_H)} = \frac{\sqrt{t} \cdot \exp\left[-\frac{(t-t_H)^2}{2\nu^2 t t_H}\right]}{\nu t_H \sqrt{2\pi} \cdot R(t_H)}, \quad (2)$$

где  $f(t_H)$  – значение плотности  $DN$ -распределения на момент времени  $t_H$ ;  $R(t_H)$  – значение вероятности безотказной работы  $DN$ -распределения на момент времени  $t_H$ ;  $\nu$  – коэффициент вариации наработки до отказа (при отсутствии уточненных данных для ИЭТ  $\nu=1$ ).

$$R(t_H) = \Phi\left(\frac{1-t_H/t}{\nu\sqrt{t_H/t}}\right) - \exp(2\nu^{-2})\Phi\left(-\frac{1+t_H/t}{\nu\sqrt{t_H/t}}\right). \quad (3)$$

Для упрощения решения (2) можно воспользоваться таблицей А.8 [2] при  $x = \frac{t_H}{t} \leq 0,15$ .

Примеры расчетов средней наработки до отказа приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчет средней наработки до отказа

Интенсивность отказов, 1/ч	Наработка, ч	Средняя наработка до отказа, ч
$\lambda_0(t_H) = 0,05 \cdot 10^{-6}$	$t_H = 25000$	$t_0 = 410000$
$\lambda_{xp}(t_H) = 0,01 \cdot 10^{-6}$	$t_H = 25000$	$t_{xp} = 490000$

Оценку  $t_{xp}$  можно получить экспериментальным путем, если имеется информация о скорости изменения определяющего параметра, характеризующего работоспособность элемента

(параметра-критерия годности). Для этого необходимо провести два разнесенные во времени замера параметра-критерия годности (ПКГ) на выборке изделий и определить среднюю скорость деградации в режиме хранения ( $a_{xp}$ ).

Состоятельной оценкой средней скорости деградации  $a_{xp}$  (изменения ПКГ) при двух замерах, разнесенных во времени при  $t_1$  и  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ), является выражение (4)

$$a_{xp} = \frac{(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)}{(t_2 - t_1)(x_{np} - \bar{x}_n)}, \quad (4)$$

где  $\bar{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^m x_{1i}}{m}$  – среднее значение ПКГ на момент времени  $t_1$ ;  $\bar{x}_2 = \frac{\sum_{i=1}^m x_{2i}}{m}$  – среднее значение

ПКГ на момент времени  $t_2$ ;  $\bar{x}_n = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ni}}{m}$  – среднее начальных значений ПКГ;  $x_{np}$  – предельное значение ПКГ.

В нашем случае  $t_2 = \tau$ . Если первичные измерения ПКГ были проведены при постановке элемента на хранение, то  $t_1 = 0$ .

Средняя наработка до отказа элемента в режиме хранения вычисляется по формуле

$$t_{xp} = a_{xp}^{-1}. \quad (5)$$

#### 4. Оценка остаточного ресурса элемента в режиме хранения

Оценку остаточного ресурса элемента после хранения в течение времени  $\tau$  вычисляем по формуле [2]

$$\pi(\tau) = \frac{(t_{xp} - \tau)\Phi\left(\frac{t_{xp} - \tau}{v\sqrt{t_{xp}\tau}}\right) + (t_{xp} + \tau)\exp(2v^{-2})\Phi\left(-\frac{t_{xp} + \tau}{v\sqrt{t_{xp}\tau}}\right)}{\Phi\left(\frac{t_{xp} - \tau}{v\sqrt{t_{xp}\tau}}\right) - \exp(2v^{-2})\Phi\left(-\frac{t_{xp} + \tau}{v\sqrt{t_{xp}\tau}}\right)}. \quad (6)$$

Оценим величину остаточного ресурса для приведенного выше примера. Допустим, что продолжительность хранения элемента составляет  $\tau = 20$  лет = 175200 ч, тогда  $\pi(\tau) = 420000$  ч.

#### 5. Оценка остаточного ресурса элемента в режиме эксплуатации

Для оценки остаточного ресурса элемента в нормальном режиме эксплуатации ( $\pi$ ) после его хранения в течение времени  $\tau$  необходимо пересчитать  $\pi(\tau)$  к  $\pi$  с учетом изменения режимов работы. Для этого вычислим значение поправочного коэффициента для интенсивностей отказов  $K_1$  при обратном переходе от режима хранения к режиму нормальной эксплуатации.

$$K_1 = \frac{\lambda_0(t_n)}{\lambda_{xp}(t_n)} = 5. \quad (7)$$

Аналитическое выражение, связывающее поправочный коэффициент к интенсивности отказов  $K_1$  с поправочным коэффициентом к средней наработке до отказа  $D_1$  имеет вид [2]

$$K_1 = \sqrt{D_1} \exp\left\{ \frac{1}{2\nu^2 x_0} \left[ 1 - D_1 + \frac{x_0^2 (D_1 - 1)}{D_1} \right] \right\} \cdot \frac{\Phi\left(\frac{1-x_0}{\nu\sqrt{x_0}}\right) - \exp(2\nu^{-2}) \Phi\left(-\frac{1+x_0}{\nu\sqrt{x_0}}\right)}{\Phi\left(\frac{D_1-x_0}{\nu\sqrt{D_1 x_0}}\right) - \exp(2\nu^{-2}) \Phi\left(-\frac{D_1+x_0}{\nu\sqrt{D_1 x_0}}\right)}, \quad (8)$$

где  $x_0 = \frac{t_n}{t_0}$ .

Для приведенного выше примера  $x_0 = 0,06$ . Подставив исходные данные и решив численно уравнение (8) относительно  $D_1$ , получим  $D_1 = 0,792$ . Так как выражение для поправочного коэффициента  $D_1$  имеет вид

$$D_1 = \frac{t_0}{t_{xp}} = \frac{\pi}{\pi(\tau)}, \quad (9)$$

то оценка остаточного ресурса элемента в нормальном режиме эксплуатации после продолжительного хранения вычисляется следующим образом:

$$\pi = \pi(\tau) D_1. \quad (10)$$

Подставив исходные данные из нашего примера, получим  $\pi = 340000$  ч.

Для упрощения вычислений поправочного коэффициента  $D_1$  можно воспользоваться приближенным выражением

$$D_1^* = \frac{t_0}{t_{xp}}. \quad (11)$$

Для нашего примера  $D_1^* = 0,837$ . В этом случае  $\pi = \pi(\tau) D_1^* = 350000$  ч.

## 6. Оценка остаточного ресурса невосстанавливаемого изделия (ССН-1) в режиме хранения

Под изделием понимается типовой функциональный блок (ТФБ), изготовленный из элементов и представляющий собой невосстанавливаемый и нерезервированный объект с последовательной структурной схемой надежности (ССН-1). Оценку остаточного ресурса изделия в режиме хранения можно осуществить двумя способами.

**Способ 1.** Оценку остаточного ресурса изделия в режиме хранения  $R(\tau)$  можно получить через оценки остаточного ресурса элементов  $\pi(\tau)$ , из которых оно состоит.

$$R(\tau) = \left( \sum_{i=1}^N n_i \pi(\tau)^{-2} \right)^{-1/2}, \quad (12)$$

где  $N$  – количество типов элементов в изделии;  $n_i$  – количество элементов каждого типа.

**Способ 2.** Оценку остаточного ресурса изделия в режиме хранения  $R(\tau)$  можно получить через оценки средней наработки до отказа элементов ( $t_{xp}$ ).

$$T_{xp} = \left( \sum_{i=1}^N n_i t_{xpi}^{-2} \right)^{-1/2}. \quad (13)$$

Остаточный ресурс изделия вычисляется по формуле

$$R(\tau) = \frac{(T_{xp} - \tau) \Phi \left( \frac{T_{xp} - \tau}{V \sqrt{T_{xp} \tau}} \right) + (T_{xp} + \tau) \exp(2V^{-2}) \Phi \left( -\frac{T_{xp} + \tau}{V \sqrt{T_{xp} \tau}} \right)}{\Phi \left( \frac{T_{xp} - \tau}{V \sqrt{T_{xp} \tau}} \right) - \exp(2V^{-2}) \Phi \left( -\frac{T_{xp} + \tau}{V \sqrt{T_{xp} \tau}} \right)}, \quad (14)$$

где  $V$  – коэффициент вариации наработки до отказа изделия (при  $v_i = 1$ ,  $V = 1$ ).

$$V = \left( \sum_{i=1}^N n_i v_i^2 t_{xpi}^{-2} \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^N n_i t_{xpi}^{-2} \right)^{-1/2}. \quad (15)$$

## 7. Оценка остаточного ресурса невосстанавливаемого изделия (СН-1) в режиме эксплуатации

Для оценки остаточного ресурса изделия в режиме эксплуатации после продолжительного хранения необходимо вычислить поправочный коэффициент для средней наработки до отказа ( $D_2^*$ ) при обратном переходе от режима хранения к режиму нормальной эксплуатации. Для этого вычислим среднюю наработку до отказа изделия в нормальном режиме эксплуатации.

$$T_0 = \left( \sum_{i=1}^N n_i t_{0i}^{-2} \right)^{-1/2}, \quad (16)$$

где  $t_{0i}$  – средняя наработка до отказа  $i$ -го типа элементов в нормальном режиме эксплуатации.

Величина поправочного коэффициента  $D_2^*$  вычисляется по формуле

$$D_2^* = \frac{T_0}{T_{xp}}. \quad (17)$$

Оценка остаточного ресурса изделия в режиме нормальной эксплуатации вычисляется аналогично (10):

$$R = R(\tau) D_2^*. \quad (18)$$

## 8. Оценка остаточного срока службы восстанавливаемого устройства (СН-1)

Устройство рассматривается как восстанавливаемый объект, включающий  $j = 1, 2, \dots, K$  типов составных частей (изделий), объединенных в СН-1. Средний остаточный ресурс устройства в нормальном режиме вычисляется по формуле

$$R = \left( \sum_{j=1}^K m_j R_j^{-2} \right)^{-1/2}, \quad (19)$$

где  $m_j$  – число составных частей  $j$ -го типа;  $R_j$  – остаточный ресурс составных частей  $j$ -го типа в нормальном режиме эксплуатации.

Далее вычисляется значение параметра  $R_2$ :

$$R_2 = \left( \sum_{j=1}^K m_j R_j^{-1} \right)^{-1}. \quad (20)$$

Находится минимум отношения  $\left\{ \frac{\pi_j}{n_j} \right\}$  (на множестве элементов, входящих в состав всех

составных частей), по которому определяется тип элементов, дающих наибольшую долю отказов, и

их остаточный ресурс принимается за параметр  $R_q = \min \left\{ \frac{\pi_j}{n_j} \right\} \cdot n_j$ , через который определяется

параметр  $R_3$ :

$$R_3 = \frac{R_q}{\pi}, \quad (21)$$

где  $\pi = 3,14$ .

Основным нормируемым показателем долговечности (ресурса) восстанавливаемого устройства является средний срок службы ( $T_{ср}$ ). В качестве предельного состояния устройства принимается снижение эффективности использования вследствие ухудшения надежности и, как следствие, экономическая нецелесообразность дальнейшей эксплуатации. В качестве критерия наступления предельного состояния восстанавливаемого устройства используется снижение средней наработки на отказ до минимального допустимого уровня  $T_{дон}$ . Значение  $T_{дон}$  устанавливается по согласованию с заказчиком из рекомендуемого ряда:  $0,75T_0$ ;  $0,5T_0$ ;  $0,33T_0$ ;  $0,25T_0$  (здесь  $T_0$  – средняя наработка до отказа устройства в режиме нормальной эксплуатации).

$$T_0 = \left( \sum_{j=1}^K m_j T_{0j}^{-2} \right)^{-1/2}. \quad (22)$$

Оценка остаточного срока службы восстанавливаемого устройства в режиме нормальной эксплуатации после продолжительного хранения производится по формуле [2]:

$$T_{сл} = \frac{1}{8760K_{уз}} \left\{ R_1 + \frac{(R_3 - R_1) \cdot \ln\left(\frac{T_{дон} - R_2}{R_1 - R_2}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1 - R_2}\right)} \right\} \text{ (лет)}, \quad (23)$$

где  $K_{уз}$  – коэффициент интенсивности эксплуатации устройства;  $K_{уз} = \frac{t_p}{24}$ ;  $t_p$  – чистое время непрерывной работы устройства в сутки.

## 9. Выводы

Остаточный ресурс полупроводникового элемента при вводе его в эксплуатацию после хранения в течение 20 лет при положительной среднегодовой температуре и отсутствии электрической нагрузки составил порядка 80% от первоначальной средней наработки до отказа. То есть, ресурс элемента уменьшился на 20%. Такого же порядка снижение ресурса следует ожидать у электронного устройства, построенного на этих элементах. Полученные результаты еще раз подтвердили известные данные о незначительном влиянии режима хранения на расходование ресурса элементов и устройств. Разработанный подход может быть использован для оценки остаточного ресурса и остаточного срока службы самых разнообразных электронных устройств, подвергшихся длительному хранению при различной температуре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник задач по теории надежности / Под ред. А.М. Половко, И.М. Маликова. – М.: Сов. радио, 1972. – 406 с.
2. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.