

УДК 620.169.2: 658.562.012.7

**В. А. Кузнецова**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**В. В. Муравьев**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОХРАНЯЕМОСТИ ТАНТАЛОВЫХ ОКСИДНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЧИП-КОНДЕНСАТОРОВ ПО ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ \*

**Введение**  
Одними из важнейших характеристик надежности танталовых конденсаторов в зависимости от назначения и условий эксплуатации являются показатели безотказности, долговечности и сохраняемости [1–7]. Гамма-процентный срок сохраняемости ( $T_{cy}$ ) – это способность конденсатора с вероятностью  $\gamma$  сохранять свои свойства в установленных пределах в определенных условиях хранения и транспортировании без воздействий электрического, механического и иного факторов. Сохраняемость конденсаторов проверяется путем проведения испытаний методом длительного хранения или путем ускоренной оценки [8].

Известно, что качество исходных материалов [9, 10] при изготовлении промышленных изделий оказывает существенное влияние на их надежность, а современные области применения танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов предъявляют повышенные требования к надежности, поэтому исследование сохраняемости – одной из характеристик надежности – является необходимой задачей.

Процесс испытаний на сохраняемость (срок сохраняемости конденсаторов может достигать 25-30 лет) занимает длительное время, поэтому для оценки качества [11, 12] материалов танталовых чип-конденсаторов, необходимо применение ускоренных методов оценки. К ускоренным методам оценки сохраняемости относятся: метод моделирования, метод прогнозирования по временной зависимости и метод прогнозирования сохраняемости по временному сечению.

В данной работе рассматривается метод прогнозирования по временной зависимости [13] для оценки сохраняемости конденсаторов по результатам испытаний при длительном хранении в условиях отапливаемого хранилища в течение срока не менее  $0,25T_{cy}$ .

### Исходные требования

Применение расчетных методик, позволяющих ускоренно оценить сохраняемость конденсаторов, – процесс сложный и может занимать длительное время (для расчета необходимы данные за 25 % от срока

сохраняемости конденсатора, что может составлять 6-7,5 лет). Поэтому требуется разработка смоделированного процесса ускорения с целью проверки сохраняемости конденсаторов, который позволил бы оценить данную характеристику конденсаторов (для подтверждения качества использованных материалов) в более сжатые сроки.

Для оценки качества примененных материалов была взята выборка танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов чип-исполнения номиналом 32 В×10 мкФ, находящихся на хранении в испытательной лаборатории ОАО «Элеконд», и для расчета использованы следующие данные:

- количество конденсаторов в выборке,  $N=100$  шт.;
- допуск (отклонение) по емкости,  $\Delta C = \pm 20\%$ ;
- количество отказавших конденсаторов,  $d_n = 0$  шт.;
- моменты контроля во время хранения,  $n = 7$ .
- фактический срок хранения в отапливаемом хранилище,  $T_{xp} = 6,25$  лет;
- заданный гамма-процентный срок сохраняемости,  $T_{cy} = 25$  лет.

### Результаты и их обсуждение

В качестве критичного параметра-критерия годности рассмотрено изменение емкости  $\Delta C$  конденсаторов во времени (см. рис.), так как изменение емкости в течение срока сохраняемости является наиболее критичной характеристикой.

В соответствии с ОСТ 11 070.050–84 «Конденсаторы и резисторы. Методы ускоренной оценки сохраняемости» имеет место следующее соотношение:

$$(1 - Q_x)(N + 1) \leq N \Rightarrow (1 - 0,01)(100 + 1) = 99,99 < 100, \quad (1)$$

где  $Q_x$  – значение допустимой доли отказавших конденсаторов,  $Q_x = 0,01$ .

На основании данного соотношения показатель сохраняемости конденсаторов по критичному параметру  $\Delta C$  прогнозируется с помощью модели для зависимости его эмпирической квантили от времени хранения.

Согласно приведенным данным критичной является верхняя квантиль, для которой наблюдаются

большие (по модулю) значения  $\Delta C$  с устойчивой зависимостью от времени. Поэтому для ограничения  $\Delta C$  сверху рассчитывают номер члена вариационного ряда  $L$  для оценки эмпирической квантили:

$$L = (1 - Q_X)(N + 1) = (1 - 0,01)(100 + 1) = 99,99, \quad (2)$$

т. е. значение искомой квантили располагаются между 99-м и 100-м членами вариационного ряда.



Распределения изменения емкости  $\Delta C$  в моменты контроля:  
№ 1 – 6 мес., № 2 – 1 год, № 3 – 2 года, № 4 – 3 года, № 5 – 4 года, № 6 – 5 лет, № 7 – 6,25 лет

Далее рассчитываются эмпирические квантили  $Z_i$  по следующей формуле:

$$Z_i = \eta_{(v_1)_i} + \left( \eta_{(v_2)_i} - \eta_{(v_1)_i} \right) (L - v_1), \quad (3)$$

где  $v_1, v_2$  – номера двух соседних членов вариационного ряда, между которыми находится искомая квантиль;  $\eta_v$  – значение параметра-критерия годности  $v$ -образца;  $i = 1 \dots n$  – число моментов контроля в течение срока хранения конденсаторов;  $\eta_{(v_1)_i}, \eta_{(v_2)_i}$  –  $v_1$ -й,  $v_2$ -й член вариационного ряда  $i$ -момента контроля.

Результаты расчета значений эмпирических квантилей для моментов контроля  $i = 1 \dots n$  указаны в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета значений эмпирической квантили для моментов контроля  $i = 1 \dots 7$

| Номер момента контроля $i$ | Момент контроля $\tau_i$ , год | Эмпирический квантиль $Z_i$ |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1                          | 0,5                            | 1,6                         |
| 2                          | 1                              | 93,6                        |
| 3                          | 2                              | 1,6                         |
| 4                          | 3                              | 162,6                       |
| 5                          | 4                              | 162,6                       |
| 6                          | 5                              | 18,1                        |
| 7                          | 6                              | 3,2                         |

Максимально допустимый срок сохраняемости конденсаторов  $\hat{\tau}_H$  для зависимости квантили  $\Delta C$  от времени хранения рассчитывается по формуле

$$\hat{\tau}_H = \exp(\hat{x}_H), \quad (4)$$

где  $\hat{x}_H$  – модель зависимости квантили параметра-критерия годности от времени хранения;

$$\hat{x}_H = \bar{x} + \frac{1}{\xi} \left( \hat{x}_1 - \sqrt{(1 - \xi) \left( \hat{x}_1^2 + \xi \frac{SS_x}{n} \right)} \right), \quad (5)$$

где  $\bar{x}$  – среднее значение функции  $x_i$ ;

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6)$$

где  $x_i$  – функция, преобразующая  $Z_i$  к прямолинейному виду при  $nv = 7$ ;  $SS_x$  – стандартное отклонение значений функции  $x_i$ .

Параметр модели  $\xi$  зависимости квантили параметра-критерия годности от времени хранения находится по формуле

$$\xi = 1 - \frac{t^2 S_M^2}{b_1^2 SS_x}, \quad (7)$$

где  $S_M^2$  – дисперсия модели;

$$S_M^2 = \max \{ S_{\text{ост}}^2, S_{\text{пр}}^2 \}, \quad (8)$$

где  $S_{\text{пр}}^2$  – погрешность измерений прибора;  $S_{\text{ост}}^2$  – остаточная дисперсия;

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (9)$$

$$S_{\text{пр}}^2 = \left( \frac{\delta}{2 \cdot 100 \bar{y}} \right)^2, \quad (10)$$

где  $\delta$  – относительная погрешность прибора при измерении  $\Delta C$ ;  $\delta = 2\%$  – абсолютная погрешность измерительного прибора, на котором проводились измерения емкости;

$$S_M^2 = \max\{4,51; 0,0008\} = 4,51; \quad (11)$$

$$t = t_\alpha(f_M),$$

где  $t$  – статистика распределения Стьюдента;  $t_\alpha$  – процентная точка распределения Стьюдента;  $\alpha$  – уровень значимости;  $f_M$  – степень свободы;

$$\alpha = 1 - \sqrt{P^*}, \quad (12)$$

где  $P^*$  – доверительная вероятность (для конденсаторов  $P^* = 0,6$ );

$$\hat{x}_1 = \frac{y_{\text{доп}} - \bar{y}}{b_1}; \quad (13)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (14)$$

где  $y_i$  – функция, преобразующая эмпирическое распределение  $\Delta C$  к нормальному распределению

$$y_i = \ln \Delta C_i, \quad (15)$$

где  $\Delta C_i$  – изменение емкости в  $i$ -й момент контроля;

$$y_{\text{доп}} = \ln(-\Delta C_{\text{н}}) = \ln(-(-20)) = 2,99, \quad (16)$$

где  $\Delta C_{\text{н}}$  – нормированное значение изменения емкости во время хранения согласно нормативно-технической документации на конденсаторы;

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (17)$$

где  $b_1$  – коэффициент модели

$$SS_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (18)$$

Значение  $t$  находится для случая одностороннего ограничения  $\Delta C_{\text{н}}$  как  $\alpha \cdot 100\%$ -ю точку с  $f_M = 6$  степенями свободы, при уровне значимости  $\alpha = 1 - \sqrt{P^*} = 0,225$ , с помощью линейной интерполяции значений точек распределения Стьюдента согласно ОСТ 11 070.050–84 «Конденсаторы и резисторы. Методы ускоренной оценки сохраняемости» (табл. 2):

$$t = 0,91,$$

Рассчитываем значения преобразующих функций:

$$\bar{y}_i = \Psi(Z_i) = \ln(-Z_i) \quad (19)$$

и

$$x_i = \Phi(\tau_i) = \ln \tau_i. \quad (20)$$

Значения преобразующих функций приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты преобразующих функций

| Преобразующие функции | Момент контроля $\tau$ , г |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                       | 0,5                        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $x_i$                 | -0,69                      | 0,00 | 0,69 | 1,10 | 1,39 | 1,61 | 1,79 |
| $y_i$                 | 0,47                       | 4,54 | 0,47 | 5,09 | 5,09 | 2,89 | 1,16 |
| $\bar{y}_i$           | 1,95                       | 2,34 | 2,74 | 2,97 | 3,13 | 3,26 | 3,36 |

Рассчитав все значения коэффициентов моделей по формулам (5)–(20), получаем максимальный допустимый срок сохраняемости:

$$\hat{\tau}_{\text{н}} = \exp(3,52) = 33,8 \text{ года.}$$

Рассчитанный гамма-процентный срок сохраняемости танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов подтверждает, что взятая выборка конденсаторов номинала 32 В×10 мкФ соответствует требованиям нормативной документации, по которой максимальный срок сохраняемости конденсаторов  $T_{\text{ср}} > 25$  лет.

**Выводы**

Метод прогнозирования по временной зависимости по результатам испытаний при длительном хранении конденсаторов в условиях отапливаемого хранилища позволил рассчитать максимальный допустимый срок сохраняемости.

В результате проведенного исследования подтверждено качество танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов на сохраняемость с максимальным расчетным сроком 33,8 года, что существенно больше заложенного в нормативной документации.

**Библиографические ссылки**

1. Кузнецова В. А., Кузнецов П. Л., Муравьев В. В. Исследование надежности танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов на основе экспериментальных данных // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2013. – № 3(59). – С. 88–91.
2. Кузнецов П. Л., Кузнецова В. А., Ломаев Г. В. Исследование влияния характеристик технологического процесса изготовления на изменения эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2014. – № 1(61). – С. 11–15.
3. Исследование влияния на эксплуатационные характеристики качества материалов танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов / В. А. Кузнецова, П. Л. Кузнецов, Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 140–143.
4. Беляева Е. А., Кузнецова В. А., Муравьев В. В. Исследование влияния срока сохраняемости на эксплуатацион-

ные характеристики и состояние объемно-пористых танталовых конденсаторов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1. – С. 96–99.

5. Сибгатуллин Б. И., Барсуков В. К. Расчет и моделирование переходных процессов при испытаниях танталовых конденсаторов импульсным током // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 1. – С. 115–120.

6. Сибгатуллин Б. И., Барсуков В. К. Механизмы отказов танталовых конденсаторов в установившихся и переходных режимах работы // Электротехнические комплексы и системы. – 2015. – С. 185–189.

7. Электроимпульсная консолидация танталовых анодов для электролитических конденсаторов / М. С. Юрлова, Е. Г. Григорьев, Е. А. Олевский, В. Д. Деменюк // Физика и химия обработки материалов. – 2014. – № 5. – С. 82–90.

Получено 05.09.2016

8. Кузнецова В. А., Кузнецов П. Л., Муравьев В. В. Указ. соч.

9. Сибгатуллин Б. И., Барсуков В. К. Расчет и моделирование переходных процессов при испытаниях танталовых конденсаторов импульсным током.

10. Сибгатуллин Б. И., Барсуков В. К. Механизмы отказов танталовых конденсаторов в установившихся и переходных режимах работы.

11. Исследование влияния на эксплуатационные характеристики качества материалов танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов.

12. Беляева Е. А., Кузнецова В. А., Муравьев В. В. Указ. соч.

13. Кузнецова В. А., Кузнецов П. Л., Муравьев В. В. Указ. соч.

УДК 621.391

И. З. Климов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ОБНАРУЖЕНИЕ НАЧАЛА СЕАНСА СВЯЗИ ПРИ РАБОТЕ В СЕТИ С НЕСТАЦИОНАРНЫМИ КАНАЛАМИ

Организация сети, использующей нестационарные декаметровые каналы связи, требует повышенной надежности обнаружения вызывного сигнала [1], поэтому использование для решения таких задач широкополосного сигнала (ШПС) представляется целесообразным. В этом случае представляет интерес поиск путей обеспечения уверенного определения начала сеанса связи.

При очень малом значении вероятности ложных обнаружений  $F_0$ , характеризующей ошибку обнаружения главного пика (ГП) широкополосного сигнала в одной точке дискретной временной оси, положительное решение по обнаружению ГП обеспечивает достаточно надежное обнаружение начала сеанса связи. Однако уменьшение значения вероятности ложной тревоги  $F_0$  приводит к повышению порога обнаружения ГП, т. е. к росту вероятности его пропуска. Поэтому значение вероятности  $F_0$  желательно выбирать исходя из условия незначительного влияния данного вида ошибок на прием цифровой информации.

При делении широкополосного сигнала на широкополосные элементы (ШПЭ) [2] разрешающая способность сигнала по времени определяется базой  $B_e$  ШПЭ. В общем случае вероятность ложного обнаружения ГП на интервале длительности посылки будет определяться значением произведения ( $B_e \times F_0$ ). Для достижения малой вероятности ошибки задача фиксации начала сеанса связи может решаться на интервале, превышающем длительность одной посылки. Действительно, если первое обнаружение ГП на интервале длительности посылки считать предварительным, а окончательное решение о начале сеанса связи принимать после получения  $k_0$  последова-

тельных решений, то вероятность ложного обнаружения начала сеанса есть

$$F_{л} = F_S^{k_0}, \quad (1)$$

где  $F_S$  – вероятность ложного обнаружения на интервале неопределенности задержек сигнала, которая значительно больше вероятности  $F_0$ , так как интервал содержит множество точек.

При  $F_S \ll 1$  вероятность (1) быстро уменьшается с увеличением параметра  $k_0$ .

Более полной, чем вероятность (1), эксплуатационной характеристикой правила определения сеанса связи будет средняя продолжительность интервала до первого ложного определения. Процесс определения начала сеанса можно представить простой цепью Маркова с  $(k_0 + 1)$ -состоянием, которая на каждом шаге с вероятностью  $F_S$  увеличивает свое состояние на 1 и с вероятностью  $(1 - F_S)$  возвращается в нулевое состояние. Для такой цепи среднее нормированное время попадания из состояния  $k$  в состояние  $k_0$  удовлетворяет разностному уравнению

$$\begin{aligned} T_k &= F_S (T_{k+1} + 1) + (1 - F_S)(T_0 + 1) = \\ &= F_S T_{k+1} + (1 - F_S) T_0 + 1 \end{aligned} \quad (2)$$

с граничным условием

$$T_{k_0} = 0. \quad (3)$$

Действительно, если цепь из состояния с номером  $k$  переходит в состояние  $(k + 1)$ , то среднее время достижения конечного (поглощающего) состояния будет равно времени достижения из этого нового состояния плюс 1 шаг. Если же из состояния  $k$  со-