

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

© 2011 И. Н. Козлова, С. В. Тюлевин, А. В. Токарева

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Приведена методика индивидуального прогнозирования (ИП) полупроводниковых приборов методом экстраполяции. Рассмотрены вопросы выбора квазидетерминированных моделей. Для определения параметров моделей использован метод наименьших квадратов. Получена прогнозная модель надёжности диодов. Приведены результаты исследования и анализа модели. Предложены варианты повышения точности прогнозирования.

*Прогнозирование, диод, качество, дрейф параметров, квазидетерминированная модель, прогнозная модель, экстраполяция, анализ, точность.*

### Введение

Увеличение роли информации в жизни общества, рост потребностей в передаче, накоплении, обработке информации обуславливают широкое использование радиоэлектронных средств (РЭС) во всех областях народного хозяйства, поэтому на РЭС возлагают все более сложные функции, что приводит к ее непрерывному усложнению. Соответственно возрастают требования, предъявляемые к качеству работы РЭС в процессе эксплуатации [1,2].

Одним из перспективных направлений поддержания работоспособного состояния аппаратуры, повышения ее надежности и качества является прогнозирование ее будущего состояния в процессе эксплуатации. При этом наиболее эффективным является индивидуальное прогнозирование (ИП) [3-5].

Для разработки эффективных операторов прогнозирования (прогнозных моделей) требуется знание информативных параметров для оценки конкретных прогнозируемых параметров для каждого электрорадиоизделия (ЭРИ) [6]. Однако для ряда ЭРИ построить модели ИП на основе методов теории распознавания образов невозможно из-за отсутствия достаточно информативных параметров. В этом случае целесообразно использовать методы экстраполяции [7-9].

В данной работе рассмотрены вопросы прогнозирования надежности диодов методами экстраполяции. Разработаны операторы

прогнозирования параметров ряда критичных малоинформативных диодов на основе квазидетерминированных моделей.

### Методика прогнозирования

Построение моделей проводилось по результатам обучающего эксперимента, проведенного по методике [10]. Были использованы выборки, для которых выявить информативные параметры с приемлемым значением коэффициента корреляции не удалось.

Для оценки значения параметра каждого экземпляра выборки на момент времени прогноза  $t_{np}$  на основании совокупности значений параметра  $y^{(j)}(t)$ , измеренных в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , должен быть построен оператор  $H_y$  следующего вида:

$$y^{*j}(t_{np}) = H_y[y_j(t_1), y_j(t_2), \dots, y_j(t_n)], \quad (1)$$

где  $t_n \ll t_{np}$ .

Таким образом, задача сводилась к выбору квазидетерминированной (КД) модели  $f_{\kappa\delta}$  и определению её коэффициентов  $a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, \dots, a_m^{(j)}$  для каждого экземпляра выборки. В этом случае оценка значения параметра  $y^{*(j)}(t_{np})$  может быть определена следующим образом:

$$y^{*(j)}(t_{np}) = f_{\kappa\delta}[t_{np}, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, \dots, a_m^{(j)}]. \quad (2)$$

Анализ экспериментальных данных обучающих выборок показал, что флуктуа-

ционная составляющая случайного процесса  $\tilde{y}_{\phi л}(t)$  несущественна по сравнению с монотонной составляющей  $y_{\text{мон}}^{(j)}(t)$  этого процесса. Ограничимся для нашего случая тремя дополнительными аргументами квазидетерминированной функции  $a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}$ . Тогда моделью случайного процесса будет функция вида

$$f_{\kappa o}(t_{np}, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}) = y^{*(j)}(t_{np}). \quad (3)$$

Воспользуемся для определения коэффициентов  $a_o, a_1, a_2$  методом наименьших квадратов. В нашем случае сущность метода сводится к нахождению таких значений  $a_o, a_1, a_2$  выбранной зависимости  $f_{\kappa o}$ , при которых сумма квадратов отклонений значений параметров  $j$ -го экземпляра, вычисленная по КД модели  $y^{*(j)}(t_i)$ , от фактических значений  $y^{(j)}(t_i)$ , будет минимальной, т.е.

$$\sum_{i=1}^k [y^{(j)}(t_i) - f_{\kappa o}(t_i, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})]^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Сумма (4) представляет собой функцию трёх переменных (трёх коэффициентов КД модели):

$$U(a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}) = \sum_{i=1}^k [y^{(j)}(t_i) - f_{\kappa o}(t_i, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})]^2. \quad (5)$$

Минимум этой функции достигается при таких  $a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}$ , при которых её частные производные обращаются в нуль. Для определения  $U_{\min}^{(j)}$  получаем систему из трёх уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U(a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})}{\partial a_o^{(j)}} &= 0; \\ \frac{\partial U(a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})}{\partial a_1^{(j)}} &= 0; \\ \frac{\partial U(a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)})}{\partial a_2^{(j)}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решение данной системы будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} a_o^{(j)} &= f_o[t_1, t_2, \dots, t_n, y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_n)]; \\ a_1^{(j)} &= f_1[t_1, t_2, \dots, t_n, y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_n)]; \\ a_2^{(j)} &= f_2[t_1, t_2, \dots, t_n, y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_n)]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким образом, решением системы (6) являются коэффициенты  $a_o, a_1, a_2$  КД модели. Подставив полученные значения  $a_o^{(j)}, a_1^{(j)}, a_2^{(j)}$  в (2), получим оценку значения параметра  $y^{*(j)}$  в момент времени  $t_{np}$ .

Например, для описания временной зависимости дрейфа тока утечки исследуемых выборок диодов была подобрана логарифмическая модель вида

$$y^{*(j)}(t_{np}) = a_o^{(j)} \ln[a_1^{(j)}(t_{np} - t_n) + e], \quad (8)$$

где  $t_n$  – время, соответствующее номеру измерения (соответствует времени старения элемента) в процессе наблюдения за дрейфом.

Особенностью данной модели является то, что функция  $f_{\kappa o}$  в начальный момент времени равна

$$f_{\kappa o}(t_1, a_o^{(j)}, a_1^{(j)}) = a_o^{(j)} \quad (9)$$

и зависит только от двух коэффициентов:  $a_o$  и  $a_1$ . Таким образом, для прогнозирования необходимо будет определить лишь коэффициент  $a_1$ . Так как  $a_o^{(j)} = y^{(j)}(t_o)$ , а для логарифмических моделей  $a_o^{(j)} = y^{(j)}(t_1)$ , то сумма (4) будет представлять собой функцию одной переменной. Обозначим её как  $g(a_1^{(j)})$ . Тогда её можно записать как

$$g(a_1^{(j)}) = \sum_{i=1}^n [y^{(j)}(t_i) - f_{\kappa o}(t_i, y^{(j)}(t_1), a_1^{(j)})]^2, \quad (10)$$

где  $i=1, 2, \dots, n$  – количество измерений. Для логарифмической модели минимум функции будет в следующем случае:

$$\frac{\partial g(a_1^{(j)})}{\partial a_1^{(j)}} = 2 \left[ \sum_{i=1}^k \frac{(a_o^{(j)})^2 (t_i - t_1) \ln [a_1^{(j)}(t_i - t_1) + e]}{a_1^{(j)}(t_i - t_1) + e} - \sum_{i=1}^k \frac{a_o^{(j)}(t_i)(t_i - t_1)}{a_1^{(j)}(t_i - t_1) + e} \right] = 0. \quad (11)$$

Полученная модель вида (8) подвергалась экзамену. Он заключался в определении ошибки прогнозирования по формуле

$$\Delta^{(j)} = \tilde{y}^{(j)}(t_{np}) - y^{*(j)}(t_{np}). \quad (12)$$

Затем оценивали точность прогнозирования (точность оператора ИП) по величине дисперсии ошибки. Она вычислялась по формуле

$$D[\tilde{y}_{np}^{(j)} - y_{np}^{*(j)}] = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k [\Delta^{(j)} - M(\Delta)]^2, \quad (13)$$

где  $\tilde{y}_{np}^{(j)} = \tilde{y}^{(j)}(t_{np})$ ;  $y_{np}^{*(j)} = y^{*(j)}(t_{np})$ ;  $M(\Delta)$  – среднее значение ошибки (математическое ожидание) для выбранной КД модели. Оно определялось по формуле

$$M(\Delta) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \Delta_k^{(j)}. \quad (14)$$

Если величина дисперсии ошибки  $D[\Delta] = D[\tilde{y}_{np} - y_{np}^*]$  согласуется с установленными требованиями, то полученную модель можно рекомендовать для прогнозирования параметров качества экземпляров других выборок.

В дальнейшем для оценки качества прогнозирования определяли величину второго начального момента  $m_{2(k)}$  по формуле

$$m_{2(k)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta_k^{(j)})^2, \quad (15)$$

где  $\Delta_k^{(j)} = y^{(j)}(t_{np}) - y^{*(j)}(t_{np})$ .

Чем меньше  $m_{2(k)}$ , тем выше точность прогнозирования. Было установлено, что на величину  $m_{2(k)}$  большое влияние оказывает систематическая ошибка. Эта ошибка устранялась введением в модель поправки вида

$$y_1^{*(j)}(t_{np}) = y^{*(j)}(t_{np}) + \Delta_k^{(1)}, \quad (16)$$

где  $\Delta_k^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta_k^{(j)1}$ .

После нахождения  $y_1^{*(j)}(t_{np})$  определяли  $m_{2(k)}^{(2)}$  и отклонения  $\Delta_k^{(2)}$ . Для моделей (16), которые не устраивали нас по точности, вводили добавку  $\delta$  в следующем виде:

$$y_2^{*(j)}(t_{np}) = a_o^{(j)} \ln \left[ \left( a_1^{(j)} + \delta \frac{a_1^{(j)}}{a_{1\max}} \right) (t_{np} - t_n) + e \right], \quad (17)$$

где  $a_{1\max}$  – максимальное значение коэффициента  $a_1$  для исследуемой выборки;

$$\delta = \frac{1}{n} (A_1^{(j)} - a_1^{(j)}), \quad A_1^{(j)} = a_1^{(j)} \text{ } \forall \delta \text{ } t = t_{\text{тв}}.$$

Если модель вида (17) не обеспечивала заданной точности, то в неё вводили поправку  $\Delta_k^{(3)}$ :

$$y_3^{*(j)}(t_{np}) = y_2^{*(j)}(t_{np}) + \Delta_k^{(3)}. \quad (18)$$

Для некоторых моделей (18) проводилось улучшение следующим образом:

$$y_4^{*(j)}(t_{np}) = y_2^{*(j)} + \Delta_k^{(3)} \frac{y_2^{*(j)}(t_{np})}{y_{2\max}^*}, \quad (19)$$

где  $y_{2\max}^*$  – максимальное значение из всех  $y_2^{*(j)}(t_{np})$ .

### Прогнозные модели

В результате сравнения полученных вариантов по точности для прогнозирования диодов 2Д503А, 2Д522Б, 2Д237 целесообразно использовать соответственно следующие модели:

$$\left( \frac{\Delta_{ym}}{I_{ym}} \right)^{(j)} = a_o^{(j)} \ln [a_1^{(j)} (1000 - 250) + e] + 0,036;$$

$$\left( \frac{\Delta_{ym}}{I_{ym}} \right)^{(j)} = a_o^{(j)} \ln [a_1^{(j)} (5000 - 250) + e];$$

$$\left( \frac{\Delta_{ym}}{I_{ym}} \right)^{(j)} = a_o^{(j)} \ln \left[ a_1^{(j)} \left( 1 - \frac{0,12}{0,47} \right) (10000 - 500) + e \right] - 0,267 \frac{y_2^{*(j)}}{y_{2\max}^*}.$$

Построенные модели удовлетворяют заданным требованиям по точности прогнозирования.

### Библиографический список

1. Кейджян, Г. А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС [Текст] / Г. А. Кейджян. – М.: Радио и связь, 1987. – 152с.
2. Пиганов, М. Н. Технологические основы обеспечения качества микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. – 231с.
3. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок [Текст] / М. Н. Пиганов. – М.: Новые технологии, 2002. – 267с.
4. Пиганов, М. Н. Прогнозирование надежности радиоэлектронных средств [Текст] / М. Н. Пиганов, С. В. Тюлевин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. - №1 (72). – С. 174-180.
5. Тюлевин, С. В. Структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической аппаратуры [Текст] / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник Самар-

ского государственного аэрокосмического университета. – 2008. - № 1. – С. 92-96.

6. Андреева, В. В. Индивидуальное прогнозирование стабильности прецизионных тонкопленочных конденсаторов на основе алюмината неодима [Текст] / В. В. Андреева, М. Н. Пиганов, В. Н. Роюк, Г. Ю. Скоморохов // Электронная техника. Сер. «Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания». – 1980. – Вып.4. – С. 10-12.

7. Тюлевин, С. В. Выбор методов индивидуального прогнозирования показателей качества РЭС на основе экспертных оценок [Текст] / С. В. Тюлевин, И. Н. Козлова // Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2009: Сборн. научн. тр. по матер. междуна. НПК 16-27.03.2009. – Т.4. – Украина, Одесса: Черноморье, 2009. – С. 25-28.

8. Андреева, В. В. Индивидуальное прогнозирование стабильности прецизион-

ных тонкопленочных конденсаторов [Текст] / В. В. Андреева, М. Н. Пиганов, Г. Ю. Скоморохов // Микроминиатюризация радиоэлектронных устройств: Межвуз. сб. – Рязань: РРТИ, 1980. – Вып.3. – С. 72-76.

9. Андреева, В. В. Индивидуальное прогнозирование экстраполяцией стабильности тонкопленочных резисторов [Текст] / В. В. Андреева, М. Н. Пиганов, А. И. Беляков // Микроминиатюризация радиоэлектронных устройств: Межвуз. сб. – Рязань: РРТИ, 1981. – Вып.4. – С. 123-127.

10. Тюлевин, С. В. Методика обучающего эксперимента при индивидуальном прогнозировании показателей качества космических РЭС [Текст] / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Материалы всероссийской НТК 13-15 мая 2008. г. Самара. – Самара: Издательство СГАУ, 2008. – С. 239-253.

## FORECASTING TECHNIQUE OF SEMICONDUCTOR DIODES QUALITY INDICATORS

© 2011 I. N. Kozlova, S. V. Tyulevin, A. V. Tokareva

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

Researchers have considered semiconductor devices individual forecasting technique by an extrapolation is resulted. The quasidetermined models choice questions. The method of the least squares is used for models parameters definition. The diodes reliability forecasting model is received. Use results and the model analysis are resulted. Variants of forecasting accuracy increase are offered.

*Forecasting, the diode, quality, parameters drift, the quasidetermined model, forecasting model, extrapolation, the analysis, accuracy.*

### Информация об авторах

**Козлова Ирина Николаевна**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: деградация полупроводниковых приборов.

**Тюлевин Сергей Викторович**, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, кандидат технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество космических радиоэлектронных средств.

**Токарева Алёна Викторовна**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

**Kozlova Irina Nikolaevna**, post-graduate student of design and manufacture electronic resources department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: degradation of semiconductor devices.

**Tyulevin Sergei Viktorovich**, assistant professor of design and production radio-electronic means department, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of space-based radio-electronic means.

**Tokareva Alena Viktorovna**, post-graduate student of design and manufacture electronic resources department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of radio electronic equipment.