УДК 621.3.382.33–027.45

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Русак И.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Боровиков С.М.– к. т. н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Для достоверного определения эффективности моделей прогнозирования класса надёжности полупроводниковых приборов для заданной наработки необходим обучающий эксперимент с большим количеством экземпляров класса надёжных и класса потенциально ненадёжных экземпляров, что может быть обеспечено методом статистического моделирования. Для проведения моделирования необходимо располагать моделями законов распределения информативных параметров отдельно в классах надёжности. На примере биполярных транзисторов КТ872А, используя экспериментальные данные обучающего эксперимента, исследованы законы распределения информативных параметров отдельно для каждого класса и установлено, что в начальный момент времени параметры неплохо описываются смещёнными трёхпараметрическими распределениями Вейбулла. По экспериментальным данным для этих распределений определены характеристики, необходимые для выполнения моделирования.

Ключевые слова: надёжность, информативные параметры, распределение Вейбулла.

Введение. Индивидуальное прогнозирование надёжности биполярных транзисторов с использованием их информативных параметров позволяет отобрать экземпляры, отвечающие требованиям. Решение о надёжности в этом случае принимают в начальный момент времени в виде отнесения прогнозируемого транзистора (конкретного экземпляра) к одному из двух классов с точки зрения его работоспособности для заданной наработки:

K_1 – класс работоспособных (иначе – надёжных) экземпляров;

K_2 – класс неработоспособных (иначе – потенциально ненадёжных) экземпляров; эти экземпляры с большой вероятностью откажут раньше момента окончания заданной наработки.

Практика показывает, что использование одного информативного параметра может привести к заметным ошибкам прогнозирования. Поэтому для прогнозирования используют несколько информативных параметров. Обычно число информативных параметров $k = 2…5$. Задачей индивидуального прогнозирования является принятие решения о классе надёжности (K_1 или K_2), к которому для заданной наработки $t_н$ будет принадлежать j-й экземпляр. Для выполнения индивидуального прогнозирования класса надёжности изделий для заданной наработки $t_н$ необходимо располагать моделью прогнозирования. Модель получают, используя предварительные экспериментальные исследования на надёжность некоторой выборки изделий интересующего типа. Эти исследования называют обучающим экспериментом, а совокупность исследуемых экземпляров – обучающей выборкой. Модель прогнозирования, называемую также прогнозирующим правилом, получают в виде [1]

$$\begin{aligned} j \in K_1, \text{если } F_j\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right] \geq P_0, \\ j \in K_2, \text{если } F_j\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right] < P_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где j – конкретный экземпляр;

$F_j[\dots]$ – прогнозирующая функция, подсчитанная для j-го экземпляра;

P_0 – порог разделения классов, выбираемый экспериментально из условия лучшего разделения на классы экземпляров обучающей выборки. Для прогнозирования класса надёжности однотипного экземпляра, не принимавшего участия в обучающем эксперименте, необходимо у этого экземпляра измерить информативные параметры $x_1, \dots, x_2$, подсчитать значение прогнозирующей функции $F_j[\dots]$ и по модели (1) принять решение о классе надёжности экземпляра по прогнозу для заданной будущей наработки $t_н$.

Основная часть. Решение о классе конкретного экземпляра для заданной наработки принимают по значениям информативных параметров этого экземпляра, используя модель прогнозирования, которую получают с помощью выбранного метода прогнозирования, используя результаты обучающего эксперимента. Возникает вопрос, какому методу отдать предпочтение, чтобы модель прогнозирования вида (1), полученная этим методам, обеспечивала бы более высокую достоверность прогнозирования. Использование реального обучающего эксперимента для получения ответа на указанный вопрос может привести к ошибочным выводам из-за ограниченности объёма обучающей выборки, составляющей обычно не более n = 100…200 экземпляров. Выходом из данной ситуации является получение результатов обучающего эксперимента методом статистического моделирования, используя компьютерную технику. При таком моделировании может быть обеспечен объём обучающей выборки, составляющий тысячи экземпляров каждого класса надёжности. Статистическое моделирование обучающего эксперимента сводится к генерированию на компьютере набора значений информативных параметров для экземпляров классов надёжности K_1 и K_2. Для выполнения генерирования информативных параметров необходимо знать их вероятностные распределения отдельно для каждого класса надёжности изделий.

Экспериментально на примере результатов обучающего эксперимента биполярных транзисторов большой мощности КТ872А были исследованы законы распределения информативных параметров отдельно для экземпляров каждого класса.

Установлено, что гипотеза о нормальных законах распределения информативных параметров не подтверждается. Лучшие результаты обеспечивает использование смещённого трёхпараметричесого распределения Вейбулла. На рисунке 1 в качестве иллюстрации показана гистограмма распределения информативного параметра $U_{КЭнас}$ (напряжение насыщения коллектор-эмиттер), построенная с использованием экземпляров класс K_1. На этом рисунке также показаны теоретическая функция плотности распределения $f(U_{КЭнас})$ и интегральная функция распределения, построенные с использованием характеристик a, b и c смещённого трёхпараметричесого распределения Вейбулла этого параметра для класса надёжности K_1.

$$f(x,a,b,c) = \begin{cases} \frac{b}{a}\left(\frac{x-c}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{x-c}{a}\right)^{b}\right] \text{ для } x > c. \\ 0 \text{ для } x \le c, \end{cases} \quad (2)$$

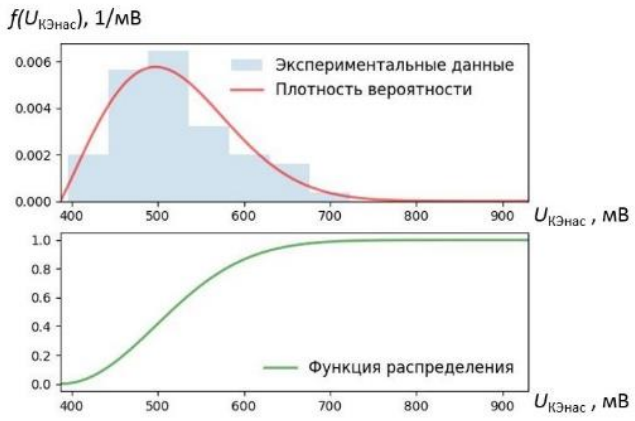

Рисунок 1 – Распределение информативного параметра $U_{КЭнас}$ для экземпляров класса K_1

Функция плотности распределения информативного параметра (обозначен через x) в случае смещённого трёхпараметрического распределения Вейбулла задаётся выражением [2] где a, b, c – параметры закона распределения (масштаба, формы и смещения).

В таблице 1 для распределения (2) указаны a, b и c, полученные по результатам обработки данных обучающего эксперимента, выполненного для биполярных транзисторов *КТ872А*.

Таблица 1 – Характеристики распределения Вейбулла для информативных параметров транзисторов *КТ872А*

Характеристика распределения Вейбулла	**Информативный параметр для экземпляров класса K_1**			**Информативный параметр для экземпляров класса K_2**		
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
a	0,856	0,0899	152,3	0,722	0,100	319,4
b	3,28	4,71	2,07	2,25	3,31	1,36
c	2,75	0,126	387,0	2,58	0,143	386,0

Примечания. 1 Пояснение параметров: x_1 – статический коэффициент передачи тока ($h_{21Э}$), x_2– обратный ток коллектора ($I_{КБ0}$), x_3 – напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($U_{КЭнас}$).

2 Параметры a и c распределения Вейбулла являются размерными. В данном случае размерность: для $I_{КБ0}$ – мкА, для $U_{КЭнас}$ – мВ.

Заключение. С использованием экспериментальных данных обучающего эксперимента, выполненного для биполярных транзисторов КТ872А, получены характеристики смещённых трёхпараметрических распределений Вейбулла для информативных параметров отдельно для классов K_1 и K_2. Эти характеристики будут использованы для генерирования информативных параметров при статистическом моделировании на компьютере обучающего эксперимента.

Список литературы

1. *Боровиков, С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники: монография / С.М. Боровиков. – М.: Новое знание, 2013. – 343 с.*

2. *Боровиков, С.М. Исследование эффективности моделей прогнозирования класса надёжности изделий электронной техники / С.М. Боровиков, В.О. Казючиц, И.В. Русак // Информационные радиосистемы и радиотехнологии-2024: Матер. открытой Республ. науч.-практ. интернет-конф., Минск, 21–22 ноября 2024 г. – Минск, 2024. – С. 295–298.*

UDC 621.3.382.33–027.45

DETERMINATION OF THE LAWS OF DISTRIBUTION OF INFORMATIVE PARAMETERS OF BIPOLAR TRANSISTORS BASED ON EXPERIMENTAL DATAS

Rusak I.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Borovikov C.M. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. To reliably determine the efficiency of the models for predicting the reliability class of semiconductor devices for a given service life, a training experiment with a large number of reliable and potentially unreliable class samples is required, which can be achieved using the statistical modeling method. To perform the modeling, it is necessary to have models of the distribution laws of informative parameters separately in the reliability classes. Using the example of bipolar transistors KT872A, using the experimental data of the training experiment, the distribution laws of informative parameters were studied separately for each class and it was found that at the initial moment of time, the parameters are well described by shifted three-parameter Weibull distributions. According to the experimental data for these distributions, the characteristics necessary for performing the modeling were determined.

Keywords: reliability, informative parameters, Weibull distribution.