

2. Надёжность технических систем : справочник / Ю.К. Беляев [и др.]; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

3. Шишмарёв, В.Ю. Надёжность технических систем : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.Ю. Шишмарёв. – М. : Изд. Центр «Академия», 2010. – 304 с.

4. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей : учебник / Е.С. Вентцель. – 9-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2003. – 576 с.

5. Теоретические основы проектирования электронных систем безопасности. Лабораторный практикум : пособие / С.М. Боровиков [и др.]; под ред. С.М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2014. – 70 с.

6. Надёжность технических систем. Лабораторный практикум : пособие / С.М. Боровиков [и др.]; под ред. С.М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2015. – 72 с.

**С.К. Дик, И.Н. Цырельчук, С.М. Боровиков, Е.Н. Шнейдеров**

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

### **Введение**

При работе изделия электронной техники (ИЭТ) его электрический функциональный параметр (обозначим через  $y$ ) изменяется, говорят деградирует, и может рассматриваться как функция времени  $t$ . Деградация функционального параметра обуславливает появление постепенного отказа ИЭТ. Постепенные отказы определяют такое понятие как параметрическая надёжность ИЭТ, количественной мерой которой является вероятность нахождения параметра  $y(t)$  в пределах норм (от  $\alpha$  до  $\beta$ ) в течение заданной наработки  $t_3$ , т. е.

$$P_{\text{п}}(t_3) = \text{Вер} \{ \alpha \leq y(t) \leq \beta, t \leq t_3 \} = P \{ \alpha \leq y(t) \leq \beta, t \leq t_3 \}, \quad (1)$$

где запись «Вер» означает вероятность, далее её будем заменять символом  $P$ . Прогнозирование параметрической надёжности ИЭТ может быть выполнено по модели деградации функционального параметра (модели постепенного отказа) и обычно применяется для отбора высоконадёжных изделий, поставляемых потребителям [1, 2].

## 1. Актуальность исследований

В работах [3, 4] для прогнозирования параметрической надёжности выборок ИЭТ было предложено использовать математическую модель деградации функционального параметра  $y(t)$  в виде условной плотности его распределения  $f(y | t)$  для наработки (временного сечения)  $t$ . Эту модель для интересующего типа ИЭТ получают один раз с помощью обучающего эксперимента, представляющего собой экспериментальное исследование определённой выборки, взятой случайным образом из партии ИЭТ [3, 4]. Полученную модель деградации параметра  $y(t)$  используют в начальный момент времени ( $t = 0$ ) для прогнозирования количественной характеристики параметрической надёжности  $P_n(t_3)$  новых выборок этого же типа ИЭТ для заданных будущих наработок  $t_3$  по принятым в теории вероятностей правилам нахождения вероятностей вида

$$P_n(t_3) = P\{\alpha \leq y(t) \leq \beta, t \leq t_3\},$$

пользуясь законом распределения случайной величины – параметра  $y(t)$  [5].

Под новыми здесь понимают те выборки, входящие в партию ИЭТ, экземпляры которых не принимали участия в обучающем эксперименте.

В работах [3, 4] за основу получения модели деградации взяты, традиционно используемый в электронике [6], нормальный закон распределения функционального параметра  $y(t)$ . В этом случае условная плотность распределения  $f(y | t)$  для рассматриваемого временного сечения  $t$  зависит от двух параметров –  $m(y | t)$  и  $\sigma(y | t)$ , представляющих собой соответственно среднее значение и среднее квадратическое отклонение  $y(t)$  во временном сечении  $t$ . Значения  $m(y | t)$  и  $\sigma(y | t)$  определяются как функции наработки  $t$  и величин  $m(y | t = 0)$  и  $\sigma(y | t = 0)$ , являющихся параметрами нормального закона в начальный момент времени ( $t = 0$ ):

$$m(y | t) = \varphi_1[t, m(y | t = 0), \sigma(y | t = 0)]; \quad (2)$$

$$\sigma(y | t) = \varphi_2[t, m(y | t = 0), \sigma(y | t = 0)]. \quad (3)$$

Модель деградации, основанная на нормальном законе, является классической, но имеет недостатки из-за того, что во многих случаях распределение параметров ИЭТ значительно отличается от нормального. Например, для полупроводниковых приборов большой мощности выполняемые выходные контрольные операции, отбор по значениям параметров, проведение тренировки и затем дальнейшая эксплуатация могут заметно деформировать нормальный закон распределения параметра  $y(t)$  во временных сечениях. Это подтверждается гистограммами распределения функциональных параметров исследуемых ИЭТ. На рисунке 1 в качестве иллюстрации показана гистограмма распределения, построенная по опытным данным для биполярных транзисто-

ров большой мощности типа КТ872А (параметр – напряжение насыщения коллектор-эмиттер  $U_{КЭнас}$ , наработка  $t = 17280$  ч). На вертикальной оси координатной сетки указаны относительные частоты  $p$  (в %) попадания параметра  $U_{КЭнас}$  в указанные интервалы значений.

Использование модели деградации параметра, основанной на нормальном законе его распределения [6], при наработках, заметно отличающихся от нуля, может приводить к значительным ошибкам прогнозирования параметрической надёжности новых выборок ИЭТ. Поэтому актуальной является задача выбора такой модели деградации, которая давала бы хорошие результаты прогнозирования в случае нормального закона распределения функционального параметра и, в тоже время, реагировала бы на возможные отклонения закона его распределения от нормального. При этом для практики модель деградации функциональных параметров ИЭТ желательно получать, основываясь на каком-то одном, в определённой степени универсальном, законе распределения.

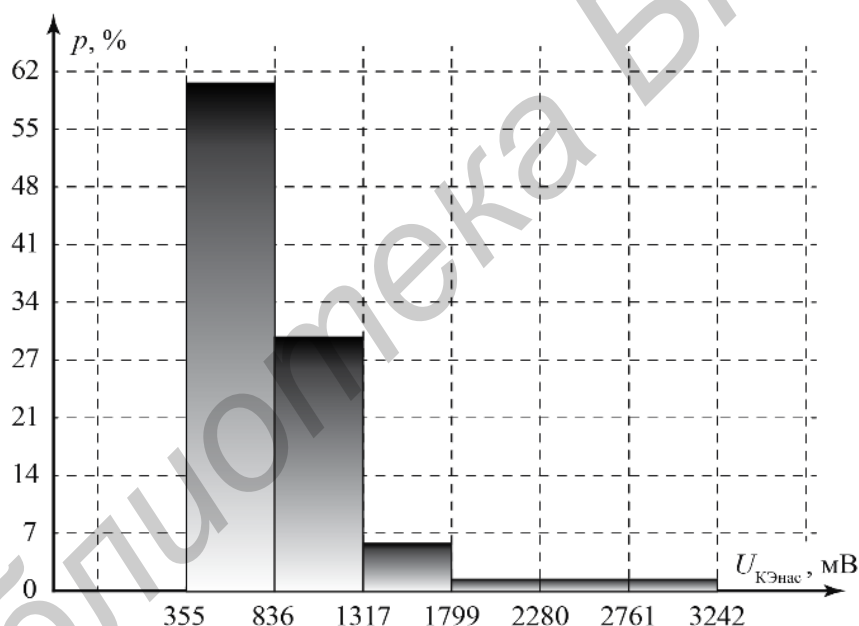


Рисунок 1 – Гистограмма распределения параметра  $U_{КЭнас}$  для наработки  $t = 17280$  ч

## 2. Модель деградации на основе распределения Вейбулла-Гнеденко

В работе [7] предложена модель деградации параметра ИЭТ, основанная на использовании трёхпараметрического распределения Вейбулла-Гнеденко, в соответствии с которым условная плотность распределения функционального параметра  $y(t)$  выборки ИЭТ в любом временном сечении  $t$  (математическая модель деградации) записывается в виде

$$f(y|t) = \frac{b}{a} \left( \frac{y|t-c}{a} \right)^{b-1} \exp \left[ - \left( \frac{y|t-c}{a} \right)^b \right] \quad \text{при } (y|t) > c, \quad (4)$$

где  $y|t$  – значение рассматриваемого функционального параметра ИЭТ, соответствующее наработке (временному сечению)  $t$ ;  $a, b, c$  – параметры распределения, найденные для наработки  $t$ ;  $a$  – параметр масштаба ( $a > 0$ ),  $b$  – параметр формы ( $b > 0$ ),  $c$  – параметр сдвига (смещения), показывающий смещение  $y(t)$  относительно его нулевого значения.

Аргументом в пользу выбора трёхпараметрического распределения Вейбулла-Гнеденко в качестве основы для построения модели деградации параметра является вид гистограмм их распределения, построенных по экспериментальным данным для различных типов полупроводниковых приборов как разновидности ИЭТ (см., например, рисунок 1).

Предлагаемая модель деградации (4) является в определённой степени универсальной, поскольку для выборок ИЭТ достаточно хорошо описывает изменение функционального параметра  $y(t)$  при любом характере его деградации, т. е. при любом виде кривой его плотности распределения, которая реально может иметь место для ИЭТ. Например, при  $b = 1$  распределение (4) совпадает с двухпараметрическим экспоненциальным распределением, при  $c = 0$  – классическим (двухпараметрическим) распределением Вейбулла-Гнеденко, при  $b = 2$  – распределением Рэля с параметром масштаба  $a/2^{0,5}$ . В случае  $b > 3 \dots 5$  распределение (4) незначительно отличается от нормального закона.

Для практических приложений интерес представляет определение значений  $a, b$  и  $c$  модели (4) как функций наработки  $t$  и основных числовых характеристик параметра  $y(t)$  в начальный момент времени – среднего значения  $m(y|t=0)$  и среднего квадратического отклонения  $\sigma(y|t=0)$ :

$$a = \varphi_1[t, m(y|t=0), \sigma(y|t=0)]; \quad (5)$$

$$b = \varphi_2[t, m(y|t=0), \sigma(y|t=0)], \quad (6)$$

$$c = \varphi_3[t, m(y|t=0), \sigma(y|t=0)]. \quad (7)$$

Метод экспериментального получения операторов  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  функциональных зависимостей (5)–(7) предлагается в [7].

Условная плотность распределения (4), полученная с учётом выражений (5)–(7), является математической моделью деградации параметра  $y(t)$  и может быть использована для прогнозирования параметрической надёжности новых выборок ИЭТ исследуемого типа.

#### 4. Эффективность математической модели деградации

Оценка эффективности математической модели деградации на основе трёхпараметрического распределения Вейбулла-Гнеденко выполнялась по средней ошибке прогнозирования [3, 4, 7] путём сравнения с моделью на основе нормального закона. В таблице 1 в качестве примера приводятся значения средней ошибки прогнозирования, подсчитанные для разных норм, устанавливаемых на параметр  $U_{КЭнас}$  биполярных транзисторов типа КТ872А. Ошибка определена в случае двух гипотез распределения  $U_{КЭнас}$  для наработки  $t$  (от 3840 до 17280 ч): нормальный закон и трёхпараметрическое распределение Вейбулла-Гнеденко.

Таблица 1 – Значения средней ошибки прогнозирования параметрической надёжности, параметр  $U_{КЭнас}$

Распределение, используемое для получения модели деградации	Средняя ошибка прогнозирования в процентах при норме на параметр, В				
	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
Нормальный	24,9	16,1	15,2	11,7	6,1
Вейбулла-Гнеденко	5,6	6,2	3,2	2,4	2,3

Результаты, подобные таблице 1, имели место для всех исследуемых типов биполярных и полевых транзисторов (КТ872А, КТ8225А, КП723Г и др.).

#### Заключение

На примере биполярных и полевых транзисторов (как разновидности ИЭТ) нескольких типов показано, что математическая модель деградации функционального параметра в виде условной плотности его распределения для заданной наработки, получаемая на основе трёхпараметрического распределения Вейбулла-Гнеденко, является более эффективной. Она обеспечивает меньшие ошибки прогнозирования параметрической надёжности новых выборок транзисторов, нежели модель деградации, построенная с учётом гипотезы о нормальном законе распределения функционального параметра.

Трёхпараметрическое распределение Вейбулла-Гнеденко в определённой степени следует рассматривать в качестве универсального, поскольку для выборок ИЭТ оно достаточно хорошо описывает деградацию функционального параметра при любом виде экспериментального закона распределения, который может иметь место для функциональных параметров ИЭТ при любой заданной наработке.

## Литература

1. Method for correlating field life degradation with reliability prediction for electronic modules / D.W. Coit [et al.] // Quality and Reliability Engineering International. – 2005. – № 21. – P. 715–726.
2. Боровиков, С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники / С.М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.
3. Физико-статистические модели деградации функциональных параметров изделий электронной техники / С.М. Боровиков [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51. – № 6. – С. 105–109.
4. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники на основе математической модели деградации функционального параметра / С.М. Боровиков [и др.] // Доклады БГУИР: электроника, материалы, технологии, информатика. – 2008. – № 6(36). – С. 32–39.
6. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 596 с.
6. Физические основы надёжности интегральных схем / В.Ф. Сынаров [и др.]; под ред. Ю. Г. Миллера. – М. : Сов. радио, 1976. – 320 с.
7. Боровиков, С.М. Модели на основе распределения Вейбулла-Гнеденко для описания деградации функциональных параметров изделий электронной техники / С.М. Боровиков, Е.Н. Шнейдеров, И.А. Бурак // Доклады НАН Беларуси. – 2015. – Т. 59. – № 3. – С. 109–115.

**В.Н. Кулинченко, А.А. Лукин**

УО «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

### **ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО МУЛЬТИВЕНДОРНОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕД ПРОГРАММНОЙ ЭМУЛЯЦИИ**

#### **Введение**

Целью эксперимента является оценка возможности применения мультивендорного принципа построения корпоративных сетей при помощи настройки взаимодействия среды виртуальной эмуляции GNS Cisco и eNSP Huawei. Данный подход призван снизить затраты потребителя на создание и обслуживание телекоммуникационной инфраструктуры предприятия, а так же повысить надежность и безотказность сети. Так же необходимо рассмотреть способы и методы программной эмуляции сетевого оборудования различных производителей. Про-