

УДК 621.382.2/3–027.45

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ДЕГРАДАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

С.М. БОРОВИКОВ, Н.И. ЦЫРЕЛЬЧУК, С.С. ДИК, Е.Н. ШНЕЙДЕРОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21 февраля 2018

Аннотация. Для полупроводниковых приборов большой мощности экспериментально получены модели деградации функционального параметра в виде условной плотности его распределения в предположении трех гипотез о законе распределения в точках наработки: нормальный, двухпараметрический экспоненциальный и Вейбулла-Гнеденко. С помощью средней ошибки прогнозирования сделано сравнение эффективности моделей деградации при определении параметрической надежности новых выборок однотипных приборов.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, транзисторы, параметрическая надежность, модель деградации параметра, ошибка прогнозирования.

Abstract. For semiconductor devices of high power, the authors experimentally obtained models of functional degradation parameter in the form of the conditional density of its distribution under the assumption of three hypotheses about the distribution law at the points of operating time: normal, two-parameter exponential and Weibull-Gnedenko. Using the average prediction error, the authors compared the effectiveness of degradation models in determining of the parametric reliability of new samples of semiconductor devices of the same type.

Keywords: semiconductor devices, transistors, parametric reliability, model of parameter degradation, prediction error.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 50-56
Effectiveness of models of degradation of functional parameters for predicting the parametric reliability of semiconductor devices
S.M. Borovikov, N.I. Tsyrelchuk, S.S. Dick, E.N. Shneiderov

Введение

Постепенные отказы полупроводниковых приборов (ППП), называемые в технической литературе также деградационными отказами, определяют понятие «параметрическая надежность», т. е. способность ППП сохранять при наработке t уровень функционального параметра $y(t)$ в пределах норм (от y_{\min} до y_{\max}), указанных в технической документации или установленных потребителем. В качестве количественной меры параметрической надежности будем рассматривать вероятность выполнения условия $y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}$ в течение заданной наработки t_3 , т. е. $P(t_3) = \text{Вер} \{y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}, t \leq t_3\} = P\{y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}, t \leq t_3\}$, где запись «Вер» означает вероятность, заменена символом P .

Путем совершенствования технологии изготовления ППП процент возникновения внезапных отказов можно существенно уменьшить. Постепенные отказы, отражающие внутренне присущие материалам ППП свойства, в частности старение, в принципе исключить невозможно. Этим вызван растущий интерес к постепенным (деградационным) отказам ППП.

Известно, что постепенные отказы и, следовательно, параметрическую надежность ППП для заданной наработки можно прогнозировать [1]. В литературе описаны подходы,

позволяющие в начальный момент времени, до монтажа готовых ППП в аппаратуру, спрогнозировать их параметрическую надежность в виде определения вероятности того, что функциональный параметр любого экземпляра выборки однотипных ППП в течение заданной наработки будет находиться в пределах указанных норм. Для применения этих подходов необходимо располагать математической моделью деградации функционального параметра. Модель должна быть получена с учетом закономерностей процесса деградации этого параметра для выборки однотипных ППП.

Актуальность разработки

Приведенная в [2] методика прогнозирования параметрической надежности выборок ППП описывает процедуру получения коэффициентов модели деградации функционального параметра в предположении, что вид модели выбирается исследователем. В ряде случаев, как отмечается в [3], можно исходить из гипотезы о нормальном законе распределения параметра в любой точке наработки (далее – временном сечении). Как показали исследования [4, 5], при длительной наработке ППП закон распределения параметра изменяется (деформируется). Использование для получения модели деградации нормального закона распределения функционального параметра может дать неприемлемые для практики результаты прогнозирования. Научный и практический интерес представляет использование моделей деградации, полученных при разных гипотезах о законе распределения функционального параметра для длительных наработок. Это позволит сравнить результаты прогнозирования, полученные по моделям, с экспериментальным уровнем параметрической надежности, сделать заключение об эффективности моделей и сформулировать рекомендации по выбору более эффективной модели деградации, обеспечивающей меньшие ошибки прогнозирования.

Теоретический анализ

Решение проблемных вопросов по выбору вида модели и алгоритма получения модели деградации функционального параметра (обозначен через y) для ППП рассматривалось в [1, 4, 5]. В качестве такой модели используется выражение условной плотности распределения функционального параметра:

$$f(y|t=t_i) = \psi[t_i, m(y|t=0), \sigma(y|t=0)] = \psi(t_i, m_0, \sigma_0), \quad (1)$$

где $f(y|t=t_i)$ – условная плотность распределения параметра y для наработки t_i ; $m(y|t=0)$, $\sigma(y|t=0)$ – среднее значение и стандартное отклонение y в начальный момент времени, полученные для выборки ППП, параметрической надежностью которой интересуются; далее эти величины обозначаются соответственно как m_0 и σ_0 ; ψ – оператор функциональной зависимости, определяемый по результатам предварительных исследований некоторого количества экземпляров исходной партии, из которой впоследствии берутся новые выборки для прогнозирования их параметрической надежности (предварительные исследования называют обучающим экспериментом, а используемые экземпляры – обучающей выборкой).

Для рассматриваемого типа ППП модель деградации вида (1) получают один раз по результатам обучающего эксперимента, состоящего в получении для экземпляров обучающей выборки данных о деградации функционального параметра. Само прогнозирование параметрической надежности следует выполнять для новых выборок, взятых из той же партии, что и обучающая выборка.

Модель деградации, основанная на нормальном законе распределения параметра, является классической. Выходные контрольные операции, отбор экземпляров по значениям параметра, проведение тренировки и затем дальнейшая эксплуатация могут заметно деформировать нормальный закон распределения параметра во временных сечениях. В качестве подтверждения приводятся гистограммы распределения, построенные для параметра $h_{21Э}$ (статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером) транзисторов типа КТ8225А (рис. 1).

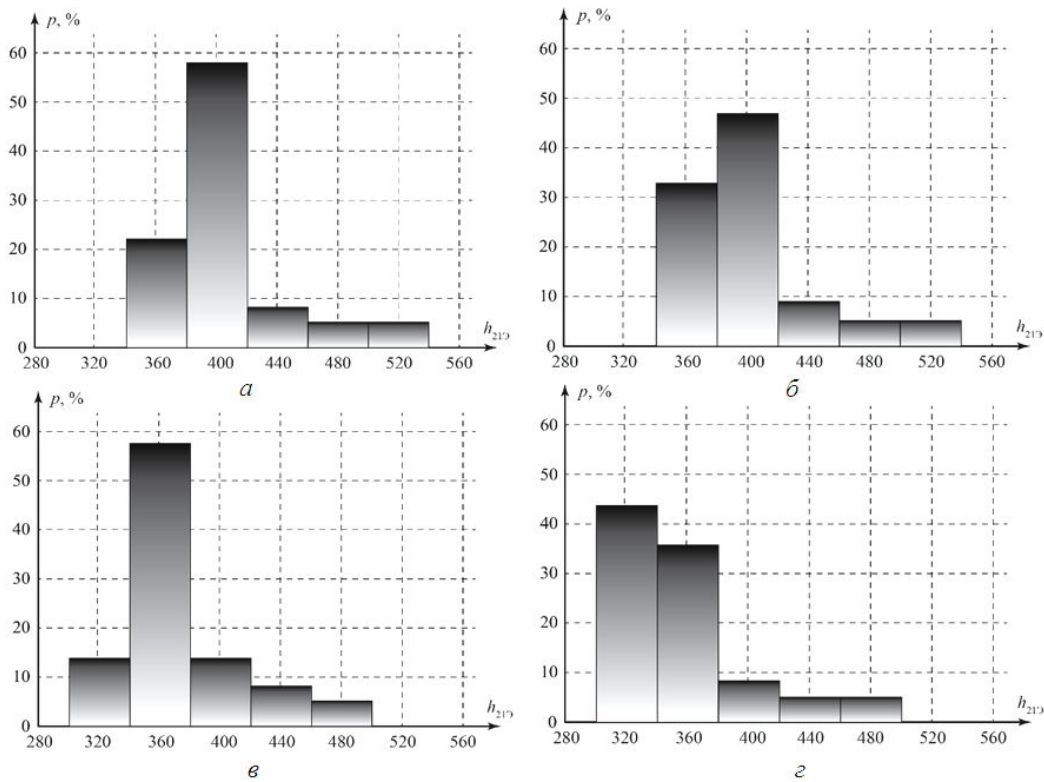


Рис. 1. Гистограммы распределения h_{213} транзисторов типа КТ8225А при наработке: $a - 0$; $b - 24250$ ч; $v - 31010$ ч; $z - 36140$ ч

Учитывая вид гистограмм распределения функциональных параметров ППП, для получения модели деградации вида (1) рассматривалось использование нормального закона, двухпараметрического (смещенного) экспоненциального распределения и трехпараметрического распределения Вейбулла-Гнеденко. Общий вид моделей деградации функционального параметра $y(t)$ и коэффициенты, подлежащие определению для этих моделей по результатам проведения обучающего эксперимента, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Общий вид моделей деградации функционального параметра

Используемый условный закон распределения	Общий вид модели деградации $y(t)$ в виде условной плотности распределения	Коэффициенты модели	Номер выражения
Нормальное распределение	$f(y t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(y t)} \exp\left\{-\frac{[y t - m(y t)]^2}{[\sigma(y t)]^2}\right\}$	$m = m(y t),$ $\sigma = \sigma(y t)$	(2)
Двухпараметрическое экспоненциальное распределение	$f(y t) = \frac{1}{\mu} \exp\left[-\frac{1}{\mu}(y t - c)\right], \text{ где } y t \geq c$	$\mu = \mu(y t),$ $c = c(y t)$	(3)
Трехпараметрическое распределение Вейбулла-Гнеденко	$f(y t) = \frac{b}{a} \left(\frac{y t - c}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{y t - c}{a}\right)^b\right], \text{ где } y t > c$	$a = a(t),$ $b = b(t),$ $c = c(t)$	(4)
Примечание: $y t$ – текущее значение y для временного сечения t .			

Значения получаемых коэффициентов моделей табл. 1 в неявном виде включают физико-химические характеристики деградации функционального параметра y для интересующей наработки t . В соответствии с выражением (1) значение любого (будем называть j -го) коэффициента модели деградации, указанного в предпоследнем столбце табл. 1, предложено определять [1] в виде функциональной зависимости от наработки t и от значений m_0 и σ_0 :

$$K_j = \varphi_j(t, m_0, \sigma_0), j = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

где K_j – обозначение j -го коэффициента модели; φ_j – оператор функциональной зависимости, подлежащий определению для j -го коэффициента по результатам обучающего эксперимента.

Операторы φ_j выражений (5) находят по алгоритму [1, 4, 5], согласно которому по данным, полученным при выполнении обучающего эксперимента, строится матрица в виде результатов пассивного факторного эксперимента, в котором в качестве функций отклика рассматриваются интересующие коэффициенты K_j модели деградации функционального параметра $y(t)$. Используя эту матрицу, уравнения для коэффициентов K_j моделей деградации могут быть получены, например, с помощью инструмента «Регрессия» пакета «Анализ данных» приложения Microsoft Excel.

Полученные модели деградации функционального параметра $y(t)$ использованы для выполнения группового прогнозирования в виде определения вероятности того, что $y(t)$ любого экземпляра выборки ППП в течение интересующей наработки t_i не выйдет за пределы норм (от y_{\min} до y_{\max}), указанных в технической документации или установленных потребителем ППП. Для расчета этой вероятности (обозначим ее как $P_n(t_i)_{\text{пр}}$) с учетом вида модели деградации (см. табл. 1) получены формулы, приведенные в табл. 2

Таблица 2. Формулы расчета прогнозной вероятности отсутствия постепенного отказа

Закон распределения, используемый для получения модели	Формула расчета прогнозной вероятности отсутствия постепенного отказа в течение заданной наработки t_i	Номер формулы
Нормальное распределение	$P_n(t_i)_{\text{пр}} = \Phi \left[\frac{y_{\max} - m(y t_i)}{\sigma(y t_i)} \right] - \Phi \left[\frac{y_{\min} - m(y t_i)}{\sigma(y t_i)} \right]$	(6)
Двухпараметрическое экспоненциальное распределение	$P_n(t_i)_{\text{пр}} = \exp \left\{ - \left[\frac{y_{\min} - c(t_i)}{\mu(t_i)} \right] \right\} - \exp \left\{ - \left[\frac{y_{\max} - c(t_i)}{\mu(t_i)} \right] \right\}$	(7)
Трехпараметрическое распределение Вейбулла-Гнеденко	$P_n(t_i)_{\text{пр}} = \exp \left\{ - \left[\frac{y_{\min} - c(t_i)}{a(t_i)} \right]^{b(t_i)} \right\} - \exp \left\{ - \left[\frac{y_{\max} - c(t_i)}{a(t_i)} \right]^{b(t_i)} \right\}$	(8)

В формулах (6)–(8) табл. 2 обозначения коэффициентов моделей соответствуют табл. 1. Значения всех коэффициентов должны быть рассчитаны по выражениям (5) для наработки t_i .

Для проверки эффективности полученной модели деградации функционального параметра использовалась контрольная выборка объемом 100 экземпляров, а само решение об эффективности модели принималось по значению средней ошибки прогнозирования параметрической надежности ($\Delta_{\text{ср}}$), определяемой для этой выборки по формуле [1]

$$\Delta_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{P_{\text{пр}}(t_i) - P_3(t_i)}{P_3(t_i)} \right)^2} \times 100 \%, \quad (9)$$

где k – количество точек наработок t_i (временных сечений), для которых определялись прогнозные и экспериментальные значения уровня параметрической надежности; $P_{\text{пр}}(t_i)$ – прогнозные значения уровня параметрической надежности экземпляров контрольной выборки, полученное для наработки t_i по формулам (6)–(8); $P_3(t_i)$ – экспериментальное значение уровня параметрической надежности экземпляров контрольной выборки, полученное для наработки t_i по классическому выражению оценки вероятности события по его частоте [1].

Экспериментальные исследования

Суть исследований состояла в проведении для выборок однотипных ППП ускоренных испытаний на длительную наработку с периодическим измерением в определенных точках наработки значений функциональных параметров каждого экземпляра выборки.

Для испытаний были выбраны следующие ППП большой мощности: кремниевые эпитаксиально-планарные транзисторы типа КТ872А, кремниевые эпитаксиально-планарные биполярные составные транзисторы Дарлингтона типа КТ8225А, кремниевые эпитаксиально-планарные полевые транзисторы с изолированным затвором типа КП723Г. В качестве функциональных параметров для ППП рассматривались те электрические параметры, которые являются важнейшими для работы электронных устройств, использующих в своем составе данные типы ППП.

Для проведения ускоренных испытаний использовались известные подходы. Ускорение испытаний ППП достигалось форсированием нагрузок (тепловой и электрической). Коэффициенты ускорения испытаний определялись по моделям Аррениуса и Эйринга. В зависимости от типа ППП общий коэффициент ускорения K_y составлял от 21 до 80 единиц. Данные об исследуемых ППП и условиях проведения ускоренных испытаний описаны в [6].

В качестве основы созданной экспериментальной установки, используемой для проведения испытаний, была выбрана нагревательная печь с возможностью обеспечения нагрева до $+200\text{ }^\circ\text{C}$ и поддержанием температуры с погрешностью не более $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$. Кроме печи, установка включала источник питания, вольтметр, амперметр, платы предохранителей, коммутационный термостойкий жгут, помехоподавляющие конденсаторы, платы с испытываемыми ППП. Измерения параметров ППП проводились на сертифицированных измерительных стендах испытательного центра завода «Транзистор» ОАО ИНТЕГРАЛ.

Результаты и их обсуждение

В процессе ускоренных испытаний были получены данные о деградации (изменении) контролируемых параметров ППП от времени ускоренных испытаний. С учетом общего коэффициента ускорения испытаний K_y эти данные были пересчитаны на наработку для обычного (нормального) режима. В качестве примера приведены экспериментальные графики деградации параметров $h_{21Э}$ и $U_{КЭнас}$ от наработки t для транзисторов большой мощности типа КТ872А (рис. 2). Обозначения и пояснения параметров по ГОСТ 20003-74. Точки на графиках соответствуют временным сечениям t_i (3840, 8320, 12800 и 17280 ч).

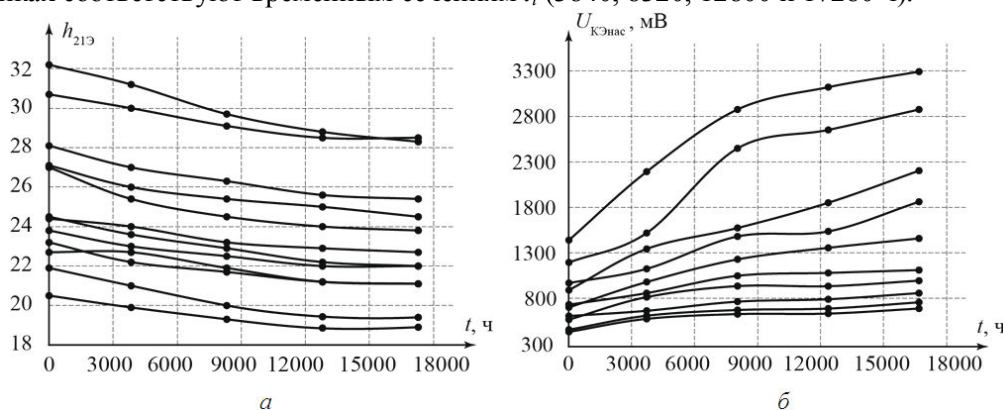


Рис. 2. Графики деградации функциональных параметров транзисторов КТ872А:
 a – функциональный параметр $h_{21Э}$; b – функциональный параметр $U_{КЭнас}$

На основе анализа экспериментальных данных установлено, что скорости деградации функционального параметра каждого отдельно взятого экземпляра различны и неодинаковы для разных интервалов наработок. Но для выборки однотипных ППП, рассматриваемой в целом, имеет место наличие (по шкале Чэддока [7]) весьма тесной или же тесной линейной корреляции между значениями функционального параметра в начальный момент времени и его значениями, соответствующими наработке (другой временной точке): для наработок от 8000 до 36 000 ч коэффициент линейной корреляции r принимал значения $|r| = 0,89...0,99$, что является теоретической предпосылкой для прогнозирования в начальный момент времени параметрической надежности выборок однотипных ППП для заданных будущих наработок.

Установлено, что при длительной наработке закон распределения функциональных параметров ППП изменяется (деформируется). В качестве подтверждения можно рассматривать вышеприведенные гистограммы распределения для параметра $h_{21Э}$ (см. рис. 1).

Сравнение эффективности моделей деградации поясняется на примере функционального параметра $U_{КЭнас}$ (напряжение насыщения коллектор-эмиттер) транзисторов большой мощности типа КТ872А. В табл. 3 приведены полученные выражения для коэффициентов моделей деградации $U_{КЭнас}$.

Таблица 3. Выражения для коэффициентов моделей деградации функционального параметра $U_{КЭнас}$ транзисторов большой мощности типа КТ872А

Условный закон распределения, используемый для получения модели деградации	Выражение для коэффициента модели деградации, полученное с помощью инструмента «Регрессия» пакета «Анализ данных» Microsoft Excel
Нормальное распределение	$m = 89,26(m_0/\sigma_0) + 0,00815(\sigma_0)^2 + 2,027t^{0,5}$ $\sigma = 0,00567(\sigma_0)^2 + 2,0077t^{0,5}$
Двухпараметрическое экспоненциальное распределение	$\mu = 0,663m_0 - 122,3(m_0/\sigma_0)^{0,5} + 1,663t^{0,5}$ $c = 0,942m_0 - 0,764\sigma_0 + 0,425t^{0,5}$
Трехпараметрическое распределение Вейбулла-Гнеденко	$a = 0,356(m_0/\sigma_0)^4 + 0,00348(\sigma_0)^2 + 1,892t^{0,5}$ $b = -0,0053m_0 + 0,00964\sigma_0 + 0,766(m_0/\sigma_0) - 0,02245t^{0,2}$ $c = 0,71m_0 - 0,116(m_0/\sigma_0)^4$

Для новой (контрольной) выборки объемом $n = 100$ экземпляров с использованием результатов измерений параметра $U_{КЭнас}$ для начального момента времени ($t = 0$) найдено: $m_0 = 605,5$ мВ; $\sigma_0 = 186,8$ мВ. Затем были получены прогнозные значения уровня параметрической надежности $P_{пр}(t_i)$ этой выборки для наработок t_i ($i = 1, \dots, 4$) по трем моделям (см. табл. 2) с учетом следующего условия параметрической надежности по параметру $U_{КЭнас}$: $U_{КЭнас} \leq U_{КЭнас.потр}$, где $U_{КЭнас.потр}$ – задаваемая потребителем норма на параметр $U_{КЭнас}$ в диапазоне 700...1200 мВ. Результаты ускоренных испытаний наработку экземпляров контрольной выборки позволили найти экспериментальные оценки вероятностей $P_3(t_i)$ и по выражению (9) подсчитать среднюю ошибку прогнозирования параметрической надежности $\Delta_{ср}$ (табл. 4).

Таблица 4. Значения средней ошибки прогнозирования $\Delta_{ср}$ (%) параметрической надежности транзисторов типа КТ872А по параметру $U_{КЭнас}$

Закон, используемый для получения модели деградации параметра $U_{КЭнас}$	Средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{ср}$ (%) при норме $U_{КЭнас.потр}$, мВ					
	700	800	900	1000	1100	1200
Нормальное распределение	24,9	16,1	15,2	11,7	13,5	6,1
Двухпараметрическое экспоненциальное распределение	14,8	4,2	3,5	3,8	7,0	3,0
Трехпараметрическое распределение Вейбулла-Гнеденко	5,6	6,2	3,2	2,4	5,8	2,3

Из табл. 4 следует, что модель деградации функционального параметра, полученная на основе трехпараметрического распределения Вейбулла-Гнеденко, обеспечивает меньшие ошибки прогнозирования уровня параметрической надежности новых однотипных выборок транзисторов типа КТ872А при разных задаваемых нормах на параметр $U_{КЭнас}$. Аналогичные результаты имели место и для других функциональных параметров транзисторов типа КТ872А, а также и для других исследуемых типов ППП (КТ8225А, КП723Г).

Заключение

С использованием экспериментальных исследований ППП трех типов показано, что математическая модель деградации функционального параметра в виде условной плотности его распределения для заданной наработки, получаемая на основе трехпараметрического распределения Вейбулла-Гнеденко, обеспечивает меньшие ошибки прогнозирования параметрической надежности выборок однотипных ППП по сравнению с моделями деградации, получаемыми на основе других законов распределения (нормального или смещенного экспоненциального).

Список литературы

1. Боровиков С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники. М.: Новое знание, 2013. 343 с.
2. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н. Методика прогнозирования параметрической надежности изделий электронной техники по модели деградации функционального параметра // Докл. БГУИР. 2014. № 6 (84). С. 5–11.

3. Физические основы надежности интегральных схем / В.Ф. Сынаров [и др.]. М.: Сов. радио, 1976. 320 с.
4. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Бурак И.А. Модели на основе распределения Вейбулла-Гнеденко для описания деградации функциональных параметров изделий электронной техники // Докл. НАН Беларуси. 2015. Т. 59. № 3. С. 109–115.
5. Borovikov S., Shneiderov E., Burak I. Models Based on the Weibull-Gnedenko Distribution for the Description of the Degradation of Functional Parameters of Electronic Devices // Computational Problems of Electrical Engineering. 2016. Vol. 6, No. 1. P. 1–8.
6. Экспериментальное исследование деградации изделий электронной техники / С.М. Боровиков [и др.] // Докл. БГУИР. 2017. № 2 (104). С. 45–52.
7. Эконометрика / И.И. Елисеева [и др.]. М.: Финансы и статистика, 2007. 576 с.

References

1. Borovikov S.M. Statisticheskoe prognozirovanie dlja otrakovki potencial'no nenadezhnyh izdelij jelektronnoj tehniky. M.: Novoe znanie, 2013. 343 s. (in Russ.)
2. Borovikov S.M., Shneiderov E.N. Metodika prognozirovaniya parametricheskoj nadezhnosti izdelij jelektronnoj tehniky po modeli degradacii funkcional'nogo parametra // Dokl. BGUIR. 2014. № 6 (84). S. 5–11. (in Russ.)
3. Fizicheskie osnovy nadezhnosti integral'nyh shem / V.F. Synarov [i dr.]. M.: Sov. radio, 1976. 320 s. (in Russ.)
4. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Burak I.A. Modeli na osnove raspredeleniya Vejbul'la-Gnedenko dlja opisaniya degradacii funkcional'nyh parametrov izdelij jelektronnoj tehniky // Dokl. NAN Belarusi. 2015. T. 59. № 3. S. 109–115. (in Russ.)
5. Borovikov S., Shneiderov E., Burak I. Models Based on the Weibull-Gnedenko Distribution for the Description of the Degradation of Functional Parameters of Electronic Devices // Computational Problems of Electrical Engineering. 2016. Vol. 6, No. 1. P. 1–8.
6. Jeksperimental'noe issledovanie degradacii izdelij jelektronnoj tehniky / S.M. Borovikov [i dr.] // Dokl. BGUIR. 2017. № 2 (104). S. 45–52. (in Russ.)
7. Jekonometrika / I.I. Eliseeva [i dr.]. M.: Finansy i statistika, 2007. 576 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Боровиков С. М., к.т.н., доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Цырельчук Н.И., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дик С.С., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шнейдеров Е.Н., старший преподаватель кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Borovikov S.M., PhD, associate professor of the department of information and computer systems design of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Tsyrelchuk N.I., PG student of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Dick S.S., PG student of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Shneiderov E.N., senior lecturer of the department of information and computer systems design of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровка, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-610-24-34;
e-mail: bsm@bsuir.by
Боровиков Сергей Максимович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-29-610-24-34;
e-mail: bsm@bsuir.by
Borovikov Sergei Maksimovich