

УДК 621.382.019.3

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПО МОДЕЛИ ДЕГРАДАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

С.М. БОРОВИКОВ, Е.Н. ШНЕЙДЕРОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 18 декабря 2013

Систематизирован метод получения модели, описывающей закономерность деградации функционального параметра выборки изделий электронной техники (ИЭТ). В качестве модели деградации рассматривается условная (для интересующей наработки) плотность распределения функционального параметра выборки ИЭТ. На основе метода разработана методика прогнозирования параметрической надежности новых однотипных выборок ИЭТ, не принимавших участие в предварительных исследованиях на этапе получения модели деградации функционального параметра. Прогноз получают в виде вероятности того, что функциональный параметр любого экземпляра новой выборки ИЭТ для заданной наработки будет иметь значение в пределах указанных норм.

Ключевые слова: изделия электронной техники, постепенные отказы, параметрическая надежность, модель деградации функционального параметра, групповое прогнозирование, методика прогнозирования.

Введение

Согласно [1] под постепенным отказом ИЭТ понимают отказ в виде постепенного изменения функционального параметра при наработке и ухода его за пределы норм, записанных в технической документации, или установленных пользователем с учетом особенностей функционирования ИЭТ в составе электронного устройства. Постепенные отказы, отражающие свойства, внутренне присущие материалам ИЭТ, в частности старение, исключить невозможно. Этим вызван повышенный интерес к постепенным отказам ИЭТ, которые нередко называют деградационными отказами. Постепенные отказы ИЭТ определяют такое понятие как параметрическая надежность. Под этой надежностью будем понимать свойство ИЭТ, состоящее в отсутствии в нем постепенного отказа по интересующему функциональному параметру в течение заданной наработки. При работе ИЭТ функциональный параметр (обозначим через y) изменяется, говорят, деградирует, и может рассматриваться как функция времени t , то есть $y = y(t)$. Параметрическая надежность характеризует способность ИЭТ сохранять уровень функционального параметра $y(t)$ в пределах норм (от a до b) в течение заданной наработки t_3 при выбранных режимах и условиях работы. Количественной мерой уровня параметрической надежности будем считать вероятность $P_n(t_3)$, определяемую как [2, 3]

$$P_n(t_3) = P\{a \leq y(t) \leq b, t \leq t_3\}, \quad (1)$$

где $P\{\dots\}$ – вероятность выполнения условия, указанного в фигурных скобках.

Известно [4], что постепенные отказы и, следовательно, параметрическую надежность ИЭТ можно прогнозировать. Для получения достоверного прогноза о постепенном отказе надо располагать количественной моделью надежности в виде зависимости деградации функционального параметра ИЭТ от времени, температуры, электрической нагрузки и других эксплуатационных факторов [5]. Такая модель базируется на изучении поведения ИЭТ не только в момент отказа, но и в ходе изменения функционального параметра ИЭТ, то есть на

исследовании кинетики отказов, и может быть получена с помощью вероятностно-статистических методов. Построенная таким способом модель деградации функционального параметра ИЭТ названа физико-статистической [3, 6, 7]. В работе [6] в качестве такой модели предложено рассматривать условную (для интересующей наработки t_3) плотность распределения функционального параметра, далее обозначена как $w(y|t)$. Если будет получена физико-статистическая модель деградации $w(y|t)$, то с математической точки зрения нахождение вероятности $P_n(t_3)$, определяемой выражением (1), не составит труда. Полученную вероятность $P_n(t_3)$ для выборки ИЭТ можно рассматривать как результат группового прогнозирования, поскольку эта вероятность в одинаковой степени относится к любому экземпляру рассматриваемой выборки ИЭТ.

Актуальность разработки

Для получения физико-статистической модели деградации функционального параметра, используемой для группового прогнозирования параметрической надежности ИЭТ, нужны предварительные исследования выборки интересующего типа ИЭТ. Выборку будем называть обучающей. Ее объем n должен быть не менее 60...100 экземпляров. Будем считать, что получаемая модель деградации функционального параметра y в виде условной плотности распределения $w(y|t)$ является двухпараметрической, то есть

$$w(y|t) = w(y|t, p_t, q_t), \quad (2)$$

где $p_t = p(y|t)$, $q_t = q(y|t)$ – параметры (иначе характеристики) условного закона распределения функционального параметра y для наработки t .

Построение модели включает следующие основные этапы [6, 7].

1. Измерение в начальный момент времени ($t = 0$) у каждого экземпляра обучающей выборки значения функционального параметра.

2. Получение для времени $t = 0$ основных числовых характеристик функционального параметра y : математического ожидания (среднего значения) $m(y|t = 0)$ и среднего квадратического отклонения $\sigma(y|t = 0)$.

3. Физическое моделирование деградации функционального параметра каждого экземпляра обучающей выборки в течение интересующего времени $t \geq t_3$.

4. Нахождение операторов φ_1 , φ_2 функциональных зависимостей

$$p(y|t) = \varphi_1[t, m(y|t = 0), \sigma(y|t = 0)], \quad (3)$$

$$q(y|t) = \varphi_2[t, m(y|t = 0), \sigma(y|t = 0)], \quad (4)$$

5. Получение модели деградации в виде условной плотности распределения (2).

Для физического моделирования деградации функционального параметра пригодны ускоренные форсированные испытания ИЭТ, проводимые обычно по типовым методикам. Эти испытания позволяют для каждого экземпляра обучающей выборки получить экспериментальное изменение функционального параметра y в течение интересующей наработки t .

Нахождение операторов φ_1 , φ_2 выражений (3) и (4) является достаточно трудоемким этапом. С методами выполнения этого этапа можно ознакомиться в [3, 6, 7].

Полученную физико-статистическую модель деградации функционального параметра можно использовать в начальный момент времени ($t = 0$) для группового прогнозирования параметрической надежности для будущих наработок t_3 новых однотипных выборок ИЭТ, т.е. таких выборок, экземпляры которых не принимали участие в обучающем эксперименте.

Для научных организаций и работников промышленности, планирующих реализацию процедуры группового прогнозирования параметрической надежности ИЭТ, важно знать не только четкую последовательность, но и содержание выполняемых действий, которые приведут к достижению цели. Поэтому систематизация метода получения физико-статистической модели, определение порядка (процедуры) решения задачи группового прогнозирования надежности ИЭТ и разработка на основе этого методики прогнозирования является актуальной задачей.

Область применения методики и используемые принципы прогнозирования параметрической надежности выборок ИЭТ

Разработанная методика определяет процедуру получения физико-статистической модели деградации, описывающей функциональный параметр обучающей выборки ИЭТ, и процедуру использования этой модели для решения задачи группового прогнозирования параметрической надежности $P_n(t_3)$ новых выборок ИЭТ для заданных будущих наработок t_3 .

Прогнозирование надежности новых выборок выполняют в начальный момент времени ($t = 0$). Прогноз получают в виде определения вероятности того, что функциональный параметр новой выборки ИЭТ для заданной будущей наработки t_3 будет находиться в пределах норм, записанных в технической документации на ИЭТ рассматриваемого типа, или же в границах, указанных потребителем ИЭТ. Это позволит поставлять потребителю выборки ИЭТ с нормированным уровнем параметрической надежности.

Отметим, что предварительные экспериментальные исследования обучающей выборки рассматриваемого типа ИЭТ проводят один раз, независимо от размера партии ИЭТ, из которой будут брать экземпляры обучающей выборки и формироваться новые выборки для прогнозирования их параметрической надежности. Обучающая выборка предназначена сугубо для получения физико-статистической модели деградации функционального параметра. На момент окончания экспериментальных исследований рабочий ресурс экземпляров этой выборки значительно расходован, поэтому ИЭТ этой выборки не должны поставляться потребителю.

Научной основой для прогнозирования постепенных отказов, следовательно, параметрической надежности выборок ИЭТ по статистическим данным функционального параметра $y(t)$ в начальный момент времени, является наличие тесной корреляции между значениями этого параметра при $t = t_0 = 0$ и значениями параметра, соответствующими различным временным сечениям t_i , $i = 1, 2, \dots, k$ [3, 6, 7]. Наличие тесной корреляции подтверждено экспериментальными исследованиями на примере таких ИЭТ как биполярные транзисторы (БТ) большой мощности нескольких типов. В табл. 1 в качестве примера приводится корреляционная матрица параметра $U_{КЭнас}$ (напряжение насыщения коллектор–эмиттер) БТ типа КТ872А для временных сечений 0, 3840, 8320, 12800 и 17280 ч [8].

Значение вероятности $P_n(t_3)$ является результатом изменения статистического распределения параметра $y(t)$ за время работы t_3 , $t_3 = t_1, t_2, \dots, t_k$ (рис. 1).

Таблица 1. Корреляция параметра $U_{КЭнас}$ БТ типа КТ872А во временных сечениях

Параметр / временное сечение (ч)	$U_{КЭнас} / 0$	$U_{КЭнас} / 3840$	$U_{КЭнас} / 8320$	$U_{КЭнас} / 12800$	$U_{КЭнас} / 17280$
$U_{КЭнас} / 0$	1,0000				
$U_{КЭнас} / 3840$	0,9588	1,0000			
$U_{КЭнас} / 8320$	0,9446	0,9446	1,0000		
$U_{КЭнас} / 12800$	0,9402	0,9402	0,9986	1,0000	
$U_{КЭнас} / 17280$	0,9186	0,9186	0,9913	0,9930	1,0000

Идеализация параметра $y(t)$ и упрощения, допускаемые при определении $w(y|t = t_i)$, оправдывают себя, поскольку дают возможность хотя бы приближенно определить количественную характеристику параметрической надежности $P_n(t_i)$ по принятым в теории вероятностей правилам нахождения вероятностей вида (1), используя закон распределения случайных величин [9]:

$$P_n(t_i) = \int_a^b w(y|t = t_i) dy = F(b|t_i) - F(a|t_i), \quad (5)$$

где $F(a|t_i)$, $F(b|t_i)$ – условная (для времени t_i) функция распределения $F(y|t)$ функционального параметра y , подсчитанная для значений $y = a$ и $y = b$.

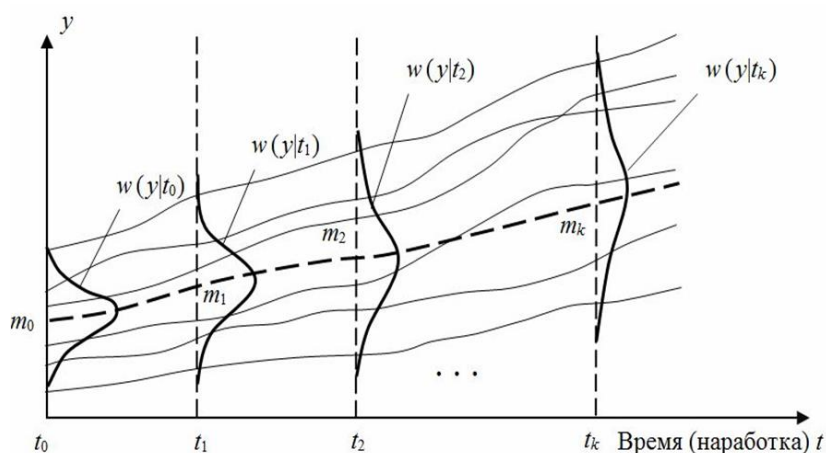


Рис. 1. Изменение плотности распределения функционального параметра y при работе ИЭТ:
 t_0, t_1, \dots, t_k – моменты времени – временные сечения;
 m_0, m_1, \dots, m_k – средние значения y во временных сечениях (штриховая линия)

Предлагаемые двухпараметрические распределения, выбираемые за основу при получении физико-статистической модели деградации функционального параметра ИЭТ, приведены в табл. 2, в которой приняты следующие обозначения: $m(y|t)$, $\sigma(y|t)$ – характеристики (параметры) нормального закона распределения, соответствующие временному сечению t ; $\mu(y|t)$, $c(y|t)$ – характеристики (параметры) двухпараметрического экспоненциального закона распределения для временного сечения t ; $y|t$ – текущие, то есть соответствующие экземплярам выборки ИЭТ, значения параметра y для временного сечения t .

Таблица 2. Распределения, используемые для физико-статистических моделей

Закон распределения	Математическое выражение для плотности распределения функционального параметра y во временном сечении t
Нормальный	$w(y t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(y t)} \exp\left\{-\frac{[y t - m(y t)]^2}{[\sigma(y t)]^2}\right\},$
Двухпараметрический экспоненциальный	$w(y t) = \frac{1}{\mu(y t)} \exp\left\{-\frac{1}{\mu(y t)}[y t - c(y t)]\right\}, \quad y t \geq c(y t),$

Структура методики прогнозирования параметрической надежности выборок ИЭТ

Структура разработанной методики поясняется схемой, показанной на рис. 2. Для проведения экспериментальных исследований формируется выборка ИЭТ рассматриваемого типа. Ее общий объем N включает обучающую выборку объемом $n \geq 60 \dots 100$ и контрольную объемом $r \geq 100$. Выборку объемом N , включающую обучающую и контрольную выборки, будем называть объединенной. Отбор N экземпляров объединенной выборки должен выполняться случайным образом из одной и той же партии ИЭТ.

Для объединенной выборки планируют проведение физического моделирования длительной наработки ИЭТ, соответствующей интересующему времени (наработке) от $t_0 = 0$ до t_k . Определяют порядок контроля значений $y(t)$ в выбранных временных сечениях t_i , $i = 1, 2, \dots, k$. Для физического моделирования рекомендуется использовать ускоренные форсированные испытания ИЭТ, проводимые обычно по типовым методикам. Эти испытания позволяют для каждого экземпляра объединенной выборки достаточно быстро получить экспериментальные значения функционального параметра $y(t)$ во временных сечениях t_i ($i = 0, 1, 2, \dots, k$), соответствующих интервалу времени (наработке) от $t_0 = 0$ до t_k . Результаты экспериментальных исследований обучающей выборки используют для получения физико-статистической модели деградации функционального параметра $y(t)$, результаты экспериментальных исследований контрольной выборки – для определения ошибок прогнозирования. Экспериментальные исследования (физическое моделирование) обеих выборок экономически целесообразно проводить одновременно, что символизируется объединяющей штриховой линией на схеме.

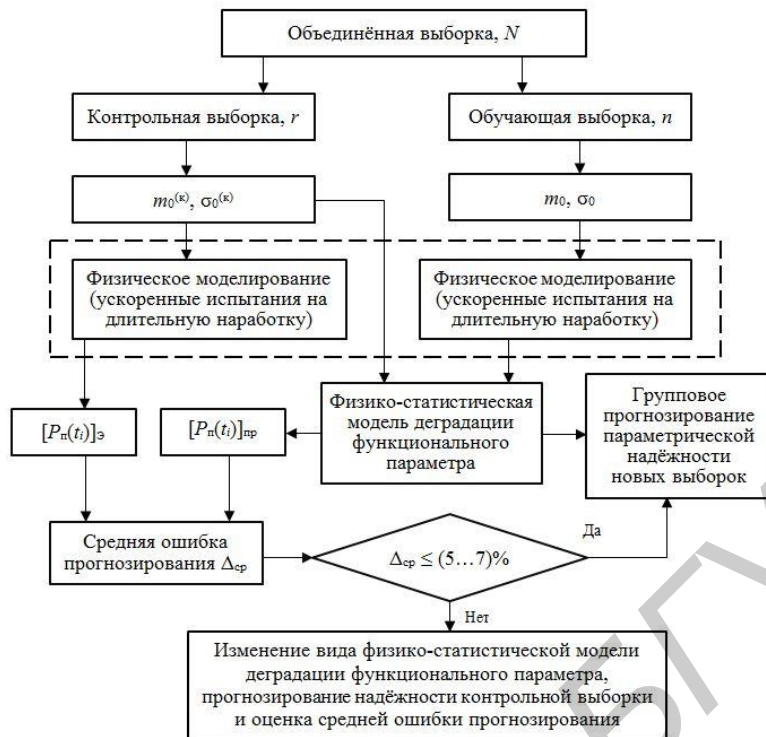


Рис. 2. Структура разрабатываемой методики прогнозирования

Запись « t_0, σ_0 » означает, что у каждого экземпляра обучающей выборки в начальный момент времени ($t_0 = 0$) измеряют значения функционального параметра $y(t)$ и подсчитывают его основные числовые характеристики: математическое ожидание (среднее значение) m_0 и среднее квадратическое отклонение σ_0 . Запись « $t_0^{(k)}, \sigma_0^{(k)}$ » означает, что аналогичные действия выполняют и для контрольной выборки. Числовые характеристики m_0 и σ_0 далее используются для получения физико-статистической модели деградации функционального параметра. Используя полученную модель деградации, с помощью числовых характеристик $m_0^{(k)}, \sigma_0^{(k)}$ контрольной выборки для i -го временного сечения определяют прогнозный уровень ее параметрической надежности $[P_n(t_i)]_{\text{пр}}, i = 1, 2, \dots, k$. Вероятности $[P_n(t_i)]_{\text{пр}}$ сравниваются с экспериментальными значениями вероятностей $[P_n(t_i)]_{\text{э}}$ и на основе этого определяется средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$. С нахождением вероятностей $[P_n(t_i)]_{\text{э}}$ и расчетом ошибки $\Delta_{\text{ср}}$ можно ознакомиться в [8]. Если значение $\Delta_{\text{ср}} \leq (5...7)\%$, то достоверность прогнозирования будем считать приемлемой для практики. При $\Delta_{\text{ср}} > (5...7)\%$ рекомендуется выбрать другой вид физико-статистической модели деградации функционального параметра (табл. 2) и, используя контрольную выборку, повторить процедуру определения ошибки $\Delta_{\text{ср}}$.

Применение методики

Разработанная методика была апробирована на примере БТ большой мощности нескольких типов. Ниже поясняется ее применение для БТ типа КТ872А. В качестве функционального параметра рассматривался статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером ($h_{21\text{э}}$), электрический режим измерения которого соответствовал технической документации.

Для применения методики было сформировано две выборки: обучающая объемом $n = 90$ экземпляров и контрольная объемом $r = 100$ экземпляров. Обучающая выборка использовалась для получения физико-статистической модели деградации $h_{21\text{э}}$. Контрольная выборка предназначалась для оценки достоверности группового прогнозирования. Применительно к ней в начальный момент времени ($t_0 = 0$) решалась задача группового прогнозирования параметрической надежности для временных сечений t_i (3840, 8320, 12800 и 17280 ч).

Физическое моделирование наработки и, следовательно, деградации параметра $h_{21\text{э}}$, состояло в проведении для БТ по типовым методикам [10–12] ускоренных форсированных

испытаний продолжительностью 216 ч, эквивалентной 17280 ч с точки зрения функционирования БТ в обычных нормальных условиях работы. Коэффициент ускорения испытаний составлял $K_y \approx 80$.

При формировании массива данных (по результатам испытаний) для получения операторов φ_1, φ_2 обучающая выборка разбивалась на три группы по 30 экземпляров в каждой.

В табл. 3 приведены результаты пассивного эксперимента, используемые для получения характеристик $m(h_{21Э}|t)$ и $\sigma(h_{21Э}|t)$ условного нормального закона распределения (см. табл. 2) параметра $h_{21Э}$ согласно выражениям (3) и (4).

Таблица 3. Массив данных для получения зависимостей (3) и (4)

Номер опыта эксперимента	Номер группы	Номер экземпляра обучающей выборки	m_0	σ_0	Временное сечение t_i , ч	$m(h_{21Э} t)$	$\sigma(h_{21Э} t)$
1	1	1...30	22,0	6,69	0	22,0	6,69
2	2	31...60	23,62	6,38	0	23,62	6,38
3	3	61...90	21,55	6,17	0	21,55	6,17
4	1	1...30	22,0	6,69	3840	22,12	6,39
5	2	31...60	23,62	6,38	3840	23,04	5,77
6	3	61...90	21,55	6,17	3840	21,42	5,88
7	1	1...30	22,0	6,69	8320	21,54	6,25
8	2	31...60	23,62	6,38	8320	22,25	5,55
9	3	61...90	21,55	6,17	8320	20,71	5,7
10	1	1...30	22,0	6,69	12800	21,1	6,08
11	2	31...60	23,62	6,38	12800	21,72	5,39
12	3	61...90	21,55	6,17	12800	20,23	5,58
13	1	1...30	22,0	6,69	17280	20,92	5,97
14	2	31...60	23,62	6,38	17280	21,48	5,29
15	3	61...90	21,55	6,17	17280	20,19	5,57

Выражения вида (3) и (4) для параметра $h_{21Э}$ получены с помощью приложения Microsoft Excel, пакет «Анализ данных», инструмент «Регрессия» с использованием экземпляров обучающей выборки:

$$m(h_{21Э}|t) = 0,729m_0 + 0,9492\sigma_0 - 9,698 \cdot 10^{-5}t; \quad (6)$$

$$\sigma(h_{21Э}|t) = -0,0003259(m_0)^2 + 1,2532\sigma_0 - 0,006178(t)^{0,5}, \quad (7)$$

где m_0, σ_0 – среднее значение и среднее квадратическое отклонение $h_{21Э}$ в начальный момент времени ($t = 0$).

Величины $m(h_{21Э}|t)$ и $\sigma(h_{21Э}|t)$, определяемые по выражениям (6) и (7), являются характеристиками p_i, q_i физико-статистической модели деградации вида (2) для параметра $h_{21Э}$. Для контрольной выборки объемом $r = 100$ экземпляров по формуле (5) были получены прогнозные $[P_n(t_i)]_{пр}$ значения параметрической надежности БТ для наработок t_i . В табл. 4 приводятся значения уровня параметрической надежности БТ, соответствующие прогнозу и экспериментальным наблюдениям для рассматриваемых временных сечений t_i при норме на параметр $h_{21Э}$, установленный потребителем $h_{21Э} \geq 15$. Экспериментальная оценка уровня параметрической надежности по параметру $h_{21Э}$ контрольной выборки БТ получена по [13].

Таблица 4. Результаты прогнозирования параметрической надежности по параметру $h_{21Э}$ БТ контрольной выборки

Норма на параметр	Вероятность $P_n(t_i)$ для времени t_i :							
	3840 ч		8320 ч		12800 ч		17280 ч	
	$[P_n(t_1)]_{пр}$	$[P_n(t_1)]_{Э}$	$[P_n(t_2)]_{пр}$	$[P_n(t_2)]_{Э}$	$[P_n(t_3)]_{пр}$	$[P_n(t_3)]_{Э}$	$[P_n(t_4)]_{пр}$	$[P_n(t_4)]_{Э}$
$h_{21Э} \geq 15$	0,821	0,824	0,805	0,765	0,784	0,735	0,759	0,735

Используя данные табл. 4, по формуле, приведенной в [13], определена средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ параметрической надежности выборок БТ: $\Delta_{\text{ср}} = 4,52\%$ при $h_{219} \geq 15$, что свидетельствует о высокой достоверности результатов прогнозирования.

Заключение

Рассмотренный метод построения физико-статистической модели деградации функционального параметра ИЭТ и принципы группового прогнозирования надежности положены в основу разработки методики, позволяющей получить модель деградации функционального параметра ИЭТ и применять ее для группового прогнозирования новых выборок ИЭТ. Применение методики на примерах БТ большой мощности подтвердило ее эффективность.

FORECASTING METHOD OF PARAMETRIC RELIABILITY OF ELECTRONIC DEVICES BY MODEL OF FUNCTIONAL PARAMETER'S DEGRADATION

S.M. BOROVIKOV, E.N. SHNEIDEROV

Abstract

The method of obtaining the model, describing degradation regularity for function parameter of electronic device (ED) sample, was systematized. The probability distribution function (for operating time of interest) of function parameter of ED sample is considered as a model of degradation. On the basis of the method the technique for prediction of parametric reliability of new ED samples was developed. It can be used for new samples of ED of the same type, but which did not participate in preliminary research/investigations. Prediction is obtained as the probability of the fact, when functional parameter of any device in a sample will have the value within the specified limits after specified operating time.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Минск, 1998.
3. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Шнейдеров Е.Н. и др. Прогнозирование надежности изделий электронной техники. Минск, 2010.
4. European Organization of the Quality Control Glassary. Bern, 1988.
5. Сынаров В.Ф., Пивоварова Р.П., Петров Б.К. и др. Физические основы надежности интегральных схем. М., 1976.
6. Боровиков С.М., Шалак А.В., Бересневич А.И. и др. // Докл. НАН Беларуси. 2007. Т. 51, № 6. С. 105–109.
7. Боровиков С. М., Шалак А.В., Бересневич А.И. и др. // Докл. БГУИР. 2008. № 6 (36). С. 32–39.
8. Боровиков С. М., Шнейдеров Е.Н. // Матер. XVI междунар. науч.-техн. конф. «Современные средства связи». Минск, 27–29 сентября 2011 г. С. 81.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., 1969.
10. Загребельный В.П., Моисеев Н.Г., Нойверт Л.М. // Электронная техника. Сер. 8. Вып. 2(139). 1990. С. 41–45.
11. Quick Logic Reliability Report / pASIC, Vialink and Quick Logic Corp. Orleans, 1998.
12. Bipolar Power Transistors Data Book 1998 / TEMIC Semiconductor GmbH. DGT-005-1297, 1997.
13. Боровиков С. М., Шнейдеров Е.Н. // Докл. БГУИР. № 7 (61). 2011. С. 31–37.