



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-88-95>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.33–027.45

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНЗИСТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.М. БОРОВИКОВ, В.О. КАЗЮЧИЦ

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

Поступила в редакцию 26 октября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. При сборке электронных комплексов медицинского назначения важным является постановка в электронные устройства высоконадежных полупроводниковых приборов. В работе с использованием экспериментальных исследований на примере биполярных транзисторов большой мощности показано, как можно выполнять отбор экземпляров повышенного уровня надежности для их последующего монтажа в ответственные электронные устройства. Для отбора высоконадежных экземпляров использовано индивидуальное прогнозирование по информативным параметрам, измеряемым у конкретного экземпляра в начальный момент времени. Экспериментальные исследования (обучающий эксперимент) включали измерение в начальный момент времени у каждого экземпляра выборки транзисторов электрических параметров, которые могут содержать информацию о надежности, а затем проведение ускоренных испытаний транзисторов на безотказность в течение времени, соответствующего нормальным условиям для наработки, указанной в технической документации. Обучающий эксперимент выполняют один раз и используют для получения прогнозирующего правила, которое применяют для других однотипных экземпляров, которые не участвовали в обучающем эксперименте. Для получения прогнозирующего правила использован метод мажоритарной логики. Прогнозирование выполняется в виде отнесения конкретного экземпляра к классу высоконадежных экземпляров для заданной будущей наработки. Для выполнения прогнозирования у интересующего конкретного экземпляра в начальный момент времени измеряют значения информативных параметров, преобразовывают их в двоичные числа (ноль или единицу) с использованием пороговых значений, найденных по результатам обучающего эксперимента, а решение о соответствии экземпляра классу высоконадежных транзисторов принимают по набору двоичных чисел. Для отнесения экземпляра к классу высоконадежных экземпляров достаточно, чтобы число единиц превышало число нулей в полученном наборе двоичных чисел.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, надежность, индивидуальное прогнозирование, информативные параметры, метод мажоритарной логики.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность администрации и работникам испытательного центра филиала «Завод Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ», при содействии которых были организованы измерения электрических параметров биполярных транзисторов на сертифицированных установках.

Для цитирования. Боровиков С.М., Казючиц В.О. Индивидуальное прогнозирование надежности транзисторов большой мощности для электронных устройств медицинского назначения. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 88-95.

INDIVIDUAL PREDICTION OF THE RELIABILITY OF HIGH POWER TRANSISTORS FOR ELECTRONIC DEVICES OF MEDICAL PURPOSES

SERGEI M. BOROVIKOV, VLADISLAV O. KAZIUCHYTS

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

Submitted 26 October 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. When assembling electronic complexes for medical purposes, it is important to install highly reliable semiconductor devices in electronic equipment. Experimental studies and the example of high-power bipolar transistors in this work show how you can select copies of an increased level of reliability for their subsequent installation in critical electronic devices. To select highly reliable samples, individual forecasting was used according to informative parameters measured for a particular sample at the initial moment in time. Experimental studies (training experiment) included measuring at the initial moment of time for each sample of transistors of electrical parameters, which may contain information on reliability, and then conducting accelerated tests of transistors for reliability for a time corresponding to normal operating conditions specified in the technical documentation. The training experiment is performed once and used to obtain a predictive rule, which is applied to other similar samples that did not participate in the training experiment. To obtain a predictive rule, the method of majority logic was used. Prediction is performed in the form of assigning a specific sample to the class of highly reliable samples for a given future operating time. To perform prediction, the values of the informative parameters are measured at the initial moment of time for a particular sample of interest, they are converted into binary numbers (zero or one) using the threshold values found from the results of the training experiment, and the decision on the correspondence of the sample to the class of highly reliable transistors is made by a set of binary numbers. To classify a sample as a highly reliable one, it is sufficient that the number of ones exceeds the number of zeros in the resulting set of binary numbers.

Keywords: semiconductor devices, reliability, individual forecasting, informative parameters, majority logic method.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors are grateful to the administration and employees of the Testing Center of the Branch “Transistor Plant” of JSC “INTEGRAL” with whose assistance measurements of the electrical parameters of bipolar transistors were organized on certified equipment.

For citation. Borovikov S.M., Kaziuchyts V.O. Individual prediction of the reliability of high power transistors for electronic devices of medical purposes. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 88-95.

Введение

Работоспособность устройств и комплексов медицинского назначения во многом определяется надежностью используемых полупроводниковых приборов [1]. Одним из способов получения экземпляров (приборов) повышенного уровня надежности является их отбор из изготовленных партий путем индивидуального прогнозирования безотказности по информативным параметрам [2–4]. При таком способе отбора в начальный момент времени у конкретного экземпляра измеряют значения информативных параметров, обрабатывают результаты измерения по определенному правилу, называемому прогнозирующим правилом, и принимают решение о соответствии или несоответствии данного экземпляра требованию повышенного уровня надежности. Отметим, что изготовленные полупроводниковые приборы прошли выходной контроль на заводе-изготовителе и в начальный момент времени отвечают требованиям технической документации, однако экземпляры отличаются друг от друга по уровню надежности (времени до отказа). Под информативным понимают такой электрический параметр полупроводникового прибора, значение которого в начальный момент времени несет

информацию о надежности (безотказности) экземпляра для заданной наработки. Прогнозирующее правило получают с помощью предварительных исследований выборки полупроводниковых приборов (примерно 50...100 экземпляров). Эти исследования являются обучающим экспериментом [2, 3]. Суть такого эксперимента состоит в измерении в начальный момент времени у каждого экземпляра обучающей выборки значений информативных параметров и проведении ускоренных (обычно форсированных) испытаний в течение времени, которое эквивалентно наработке полупроводниковых приборов, указанной в документации или заданной заказчиком электронной аппаратуры. После окончания ускоренных испытаний выясняют техническое состояние экземпляров обучающей выборки: работоспособное или неработоспособное. Если экземпляр не отказал по типу внезапный или постепенный отказ, то он на момент окончания испытаний является работоспособным и считается отвечающим требованию по надежности, в противном случае – неработоспособным и являющимся в начальный момент времени потенциально ненадежным. Обучающий эксперимент позволяет получить в неявном виде связь между значениями информативных параметров в начальный момент времени и номером класса экземпляров выборки с точки зрения надежности: K_1 – класс экземпляров повышенного уровня надежности, K_0 – класс потенциально ненадежных экземпляров. Прогнозирующее правило получают один раз по результатам обучающего эксперимента. Оно должно показывать, как по значениям информативных параметров конкретного экземпляра в начальный момент времени принимать решение о классе экземпляра с точки зрения его надежности в будущем. При индивидуальном прогнозировании это правило применяют к однотипным экземплярам, не принимавшим участия в обучающем эксперименте.

Многие электронные устройства и комплексы медицинского назначения содержат в своем составе биполярные транзисторы большой мощности (источники питания, генераторы излучений, схемы управления), которые во многом определяют надежность электронных изделий. Поэтому выполнение процедуры прогнозирования надежности для биполярных транзисторов является актуальной задачей.

Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования предусматривали обучающий эксперимент, методика проведения которого включала следующие этапы:

- выбор для исследований типа биполярных транзисторов большой мощности;
- планирование и проведение обучающего эксперимента;
- построение прогнозирующего правила и оценка его эффективности.

В качестве исследуемых биполярных транзисторов, на примере которых решалась задача индивидуального прогнозирования надежности, были выбраны биполярные транзисторы большой мощности типа КТ872А. Их выбор был обусловлен интересами заказчика электронных устройств.

Планирование обучающего эксперимента предусматривало уточнение объема обучающей выборки, определение режима и времени проведения ускоренных испытаний биполярных транзисторов на безотказность, определение для выбранных транзисторов перечня электрических параметров, исследуемых на информативность.

Проведение обучающего эксперимента предусматривало:

- создание экспериментальной установки для ускоренных испытаний;
- измерение в начальный момент времени у каждого экземпляра обучающей выборки значений электрических параметров, которые гипотетически могли оказаться информативными;
- проведение самих ускоренных испытаний;
- контроль технического состояния экземпляров обучающей выборки на момент окончания испытаний.

Для ускорения испытаний на надежность транзисторов использовались известные подходы [5–7]. Ускорение испытаний достигалось применением тепловой нагрузки и обратного электрического напряжения, прикладываемого к коллекторному переходу (табл. 1).

Таблица 1. Данные о транзисторах и условиях проведения ускоренных испытаний
Table 1. Data on transistors and conditions for conducting accelerated tests

Характеристика, параметр, величина Characteristic, parameter, magnitude	Значение Value
Характеристики и величины, выбранные из технических источников или принятые для расчета Characteristics and values selected from technical sources or taken for calculation	
Наработка, указываемая в технической документации, ч	15 000
Максимальная мощность рассеивания коллектором при $T \leq 25$ °С, P_{\max} , Вт	100
Предельно допустимое напряжение коллектор-эмиттер U_{\max} , В	700
Тепловое сопротивление кристалл-корпус $R_{\text{кр-корп}}$, °С/Вт	1,25
Усредненное значение использованной в расчетах энергии активации E_a , эВ	0,7
Температура ускоренных испытаний T_y , °С	135
Обратное напряжение U_y , прикладываемое к коллекторному переходу при испытании, В	600
Режим, принятый за обычные (нормальные) условия работы Mode taken as usual (normal) working conditions	
Коэффициент нагрузки по мощности $K_n^{(P)}$	0,5
Коэффициент нагрузки по напряжению $K_n^{(U)}$	0,7
Температура окружающей среды (корпуса транзистора) $T_{\text{ср}}$, °С	+55
Расчетные величины Calculated values	
Время ускоренных испытаний (при значении E_a), ч	238
Значение P_{\max} при $T = +55$ °С, Вт	78
Перегрев ΔT (в °С), имитирующий мощность P_{\max} при $T_{\text{ср}} = +55$ °С	47,5
Коэффициент ускорения испытаний за счет повышенной температуры, $K_y^{(T)}$	5,6
Коэффициент ускорения испытаний за счет обратного напряжения, $K_y^{(U)}$	11,25
Общий коэффициент ускорения, K_y	63

В качестве основы экспериментальной установки использована печь, обеспечивающая нагрев до температуры +200 °С с погрешностью поддержания выбранной температуры не более ± 2 °С. Плата с испытываемыми транзисторами помещалась в печь. В состав экспериментальной установки входили также технические средства, выполняющие вспомогательные функции (источник питания, вольтметр, предохранители на каждый экземпляр испытываемой выборки, помехоподавляющие конденсаторы).

Измерение большинства электрических параметров исследуемых биполярных транзисторов выполнялось на сертифицированных измерительных установках «ИНЕЙ» и «ГАММА» испытательного центра ОАО «ИНТЕГРАЛ». Некоторые специфические параметры измерялись с использованием стандартных измерительных приборов в лабораториях университета. Объем обучающей выборки – 96 экземпляров.

Результаты и их обсуждение

После завершения ускоренных испытаний уточнялось техническое состояние транзисторов обучающей выборки. В случае отсутствия внезапного отказа или нахождения функционального электрического параметра в пределах норм, указанных в технической документации, экземпляр считался отвечающим требованию повышенной надежности для наработки 15 000 ч (обозначен как класс K_1), в противном случае – потенциально ненадежным (обозначен как класс K_0). В качестве электрического параметра, по значению которого принималось решение о наличии постепенного отказа транзистора, рассматривалось напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{\text{КЭнас}}$ при токе коллектора $I_{\text{К}} = 4,5$ А и токе базы $I_{\text{Б}} = 2$ А.

В качестве результатов обучающего эксперимента использовались данные, полученные при ускоренных испытаниях. Их запись отвечает виду табл. 2.

Таблица 2. Вид результатов обучающего эксперимента
Table 2. Form of the results of the training experiment

Номер экземпляра Sample number	Значение электрического параметра, исследуемого на информативность (начальный момент времени) The value of the electrical parameter studied for informativeness (initial moment of time)				Класс экземпляра для наработки 15 000 ч (момент окончания ускоренных испытаний) Sample class for operating time 15 000 h (moment of completion of accelerated tests)
	Параметр 1 Parameter 1	Параметр 2 Parameter 2	...	Параметр 22 Parameter 22	
1	$x_1^{(1)}$	$x_2^{(1)}$		$x_{22}^{(1)}$	K_s ($s = 1$ или 0)
...					...
96	$x_1^{(96)}$	$x_2^{(96)}$		$x_{22}^{(1)}$	K_s ($s = 1$ или 0)

Данные вида табл. 2 использованы для определения информативных параметров [8, 9], а далее – для получения прогнозирующего правила. Электрические параметры, исследуемые на информативность и используемые в качестве информативных, в табл. 2 и при построении прогнозирующего правила обозначены символом x с соответствующим индексом.

Используя результаты обучающего эксперимента (см. табл. 2), были определены наиболее информативные параметры из числа исследуемых. Решение о степени информативности принималось по значению модуля коэффициента парной корреляции между электрическим параметром в начальный момент времени и номером класса (1 или 0) на момент окончания ускоренных испытаний, а также по значению информационной меры Кульбака $D(x_i)$, определяемой по выражению [8]

$$D(x_i) = \frac{[M(x_i | K_1) - M(x_i | K_0)]^2}{\sigma^2(x_i | K_1) + \sigma^2(x_i | K_0)}, \quad (1)$$

где $M(x_i | K_1)$, $M(x_i | K_0)$ – математические ожидания (средние значения) параметра x_i , для экземпляров соответственно класса K_1 и класса K_0 ; $\sigma(x_i | K_1)$, $\sigma(x_i | K_0)$ – стандартные отклонения x_i для экземпляров соответственно класса K_1 и класса K_0 .

В табл. 3 для наиболее информативных параметров, из числа исследуемых на информативность, приводятся коэффициенты линейной корреляции с номером класса, а также значения информационной меры Кульбака.

Таблица 3. Информативные параметры
Table 3. Informative parameters

Параметр, Parameter	Режим измерения Measurement Mode	Используемое обозначение Used notation	Коэффициент корреляции Correlation coefficient	Информационная мера Кульбака $D(x_i)$ Kullback Information Measure $D(x_i)$	Пороговый уровень x_{i0} Threshold level of x_{i0}	Условие получения $z_i = 1$ Condition for obtaining of $z_i = 1$
$h_{21Э}$	$I_K = 7$ А	x_1	0,452	0,498	3,38	$\geq x_{10}$
$I_{КЭ0}$	$U_{КЭ} = 500$ В	x_2	0,453	0,487	0,22 мкА	$\leq x_{20}$
$U_{КЭнас}$	$I_K = 7$ А, $I_B = 3,5$ А	x_3	0,443	0,435	598 мВ	$\leq x_{30}$

Пояснение параметров, включенных в табл. 3: $h_{21Э}$ – статический коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером; $I_{КЭ0}$ – обратный ток коллекторного перехода; $U_{КЭнас}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер. Если измеренное значение параметра x_i не отвечает условию последнего столбца табл. 3, то принимается $z_i = 0$.

Получение прогнозирующего правила

Для получения прогнозирующего правила использован метод пороговой логики [10], согласно которому значения информативных параметров x_1 , x_2 и x_3 преобразовываются в двоичные числа z_1 , z_2 и z_3 (единицу или нуль), пользуясь заранее найденными по результатам обучающего эксперимента пороговыми уровнями x_{i0} (см. табл. 3). Пороговый уровень x_{i0}

и соотношение для преобразования выбираются таким образом, чтобы экземплярам повышенного уровня надежности (класс K_1) в основном соответствовали значения $z_i = 1$, а потенциально ненадежным экземплярам (класс K_0) – значения $z_i = 0$.

Для получения прогнозирующего правила необходимо для каждого j -го экземпляра обучающей выборки ($j = 1, 2, \dots, 96$) получить набор двоичных чисел $z_1^{(j)}, z_2^{(j)}$ и $z_3^{(j)}$ и поставить этому набору в соответствие значение решающей функции $F^{(j)}$, причем функция F выбирается так, чтобы для обучающей выборки ее большие значения в основном отвечали экземплярам класса K_1 , меньшие значения – экземплярам класса K_0 [2].

Авторами для получения значений решающей функции F предлагается новый способ, основанный на использовании понятий «частная информация о событии», содержащаяся в сообщении о другом событии [2]. Применительно к прогнозированию по информативным параметрам в качестве таких понятий могут рассматриваться частная информация о принадлежности экземпляра к классу K_1 (обозначена как $I(K_1 | z_i = \xi)$) и частная информация о принадлежности этого же экземпляра к классу K_0 (обозначена как $I(K_0 | z_i = \xi)$), содержащаяся в сообщении о том, что i -й двоичный сигнал z_i принял конкретное значение $z_i = \xi$ ($\xi = 1$ или $\xi = 0$).

Предлагаемый алгоритм получения $F^{(j)}$ учитывает информацию, которую содержит полученный набор двоичных чисел как о классе K_1 , так и о классе K_0 :

$$F^{(j)} = \sum_{i=1}^k I(K_1 | z_i^{(j)} = \xi) - \sum_{i=1}^k I(K_0 | z_i^{(j)} = \xi) = \sum_{i=1}^k \log \frac{P(K_1 | z_i^{(j)} = \xi)}{P(K_1)} - \sum_{i=1}^k \log \frac{P(K_0 | z_i^{(j)} = \xi)}{P(K_0)}, \quad (2)$$

где k – число используемых информативных параметров и, следовательно, двоичных чисел z_i ; $P(K_s | z_i^{(j)} = \xi)$ – вероятность принадлежности экземпляра к классу K_s при условии, что в результате преобразования информативного параметра $x_i^{(j)}$ j -го экземпляра в двоичное число $z_i^{(j)}$ последнее приняло значение, равное ξ ($\xi = 1$ или $\xi = 0$); $P(K_s)$ – начальная вероятность принадлежности экземпляра к классу K_s ($s = 1$ или $s = 0$).

Для двоичных чисел $z_i = 1$ частная информация о классе K_1 будет положительной, а для $z_i = 0$ – отрицательной. Информация о классе K_0 , определяемая по алгоритму (2), для $z_i = 1$ будет отрицательной, а для $z_i = 0$ – положительной.

В табл. 4 приведены полученные по результатам обучающего эксперимента вероятности, используемые в алгоритме (2), и значения частной информации о классах K_1 и K_0 .

Таблица 4. Данные для подсчета решающей функции

Table 4. Data for calculating the decision function

z_i	$P(K_1 1)$	$P(K_1 0)$	$P(K_1)$	$I(K_1 1)$	$I(K_1 0)$	$P(K_0 1)$	$P(K_0 0)$	$P(K_0)$	$I(K_0 1)$	$I(K_0 0)$
z_1	0,776	0,333	0,564	0,460	-0,758	0,224	0,667	0,436	-0,958	0,612
z_2	0,717	0,294	0,564	0,346	-0,939	0,283	0,706	0,436	-0,622	0,695
z_3	0,719	0,233	0,564	0,350	-1,273	0,281	0,767	0,436	-0,633	0,814

В табл. 5 указаны сочетания, построенные из двоичных чисел z_1, z_2 и z_3 для класса K_1 , записаны значения F и значения частной информации о классе K_1 и классе K_0 .

Таблица 5. Прогнозирующее правило в виде логической таблицы для класса K_1

Table 5. Predictive rule as a logical table for class K_1

Сочетание z_i Combination z_i			Значение F , подсчитанное по алгоритму (2) F value calculated by algorithm (2)	$\sum_{i=1}^k I(K_1 z_i = \xi)$	$\sum_{i=1}^k I(K_0 z_i = \xi)$
z_1	z_2	z_3			
1	1	1	3,369	1,156	-2,213
1	1	0	0,299	-0,467	-0,766
1	0	1	0,767	-0,129	-0,896
0	1	1	0,581	-0,062	-0,643

Сочетания, не приведенные в табл. 5, соответствуют прогнозу о принадлежности экземпляра к классу K_0 . Для этих сочетаний значение F , подсчитанное по алгоритму (2), будет отрицательным. Порогом разделения классов является значение $F = 0$, при этом, как следует из анализа обучающей выборки, вероятность правильного распознавания по прогнозу экземпляров повышенного уровня надежности (класс K_1) составляет 0,93.

Заклучение

Экспериментально установлено, что электрические параметры ($h_{21Э}$ – статический коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером, $I_{КЭ0}$ – обратный ток коллекторного перехода, $U_{КЭнас}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер), используемые в качестве информативных для исследуемого типа биполярных транзисторов (КТ872А), имеют примерно одинаковую информативность, поэтому для получения прогнозирующего правила представилось возможным использовать метод мажоритарной логики [2], являющийся частным случаем метода пороговой логики [10]. Прогнозирующее правило, полученное методом мажоритарной логики, позволяет в начальный момент времени принимать решение о принадлежности биполярных транзисторов к классу высоконадежных экземпляров по большинству единиц в наборе двоичных чисел, получаемом для конкретного экземпляра путем преобразования его информативных параметров (результатов измерения параметров) в двоичный код. Для отнесения конкретного экземпляра к классу высоконадежных экземпляров достаточно, чтобы число единиц превышало число нулей в полученном для него наборе двоичных чисел. При применении предлагаемого метода для решения практических задач с использованием логических таблиц отпадает необходимость выполнения математических расчетов на этапе прогнозирования надежности однотипных экземпляров, не принимавших участия в обучающем эксперименте.

Список литературы

1. Харченко В.А. Проблемы надежности электронных компонентов. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2015;18(1):52-57.
2. Боровиков С.М. *Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники*. Москва: Новое знание; 2013.
3. Пиганов М.Н. *Индивидуальное прогнозирование качества элементов и компонентов микросборок*. Москва: Новые технологии; 2002.
4. Горлов М.И., Сергеев В.А. *Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий*. Ульяновск: УЛГТУ; 2015.
5. Robinson L.E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
6. Bipolar Power Transistor. Data Book 1998. *TEMIC Semiconductors*. 1997;12:35-42.
7. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Плебанович В.И., Бересневич А.И., Бурак И.А. Экспериментальное исследование деградации изделий электронной техники. *Доклады БГУИР*. 2017;2(104):45-52.
8. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Шнейдеров Е.Н., Бересневич А.И. *Прогнозирование надежности изделий электронной техники*. Минск: МГВРК; 2010.
9. Мишанов Р.О., Пиганов М.Н. Методика определения набора информативных параметров для проведения индивидуального прогнозирования качества и надежности радиоэлектронных средств. *Надежность и качество сложных систем*. 2017;17(1):93-103.
10. Боровиков С.М., Бересневич А.И., Хмыль А.А., Емельянов А.В., Цырельчук И.Н. Метод прогнозирования надежности изделий электронной техники. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2006;50(4):105-109.

References

1. Kharchenko V.A. [Problems of Reliability of Electronic Components]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Proceedings of higher educational institutions. Materials of Electronics Engineering*. 2015;18(1):52-57. (In Russ.)
2. Borovikov S.M. [Statistical forecasting for the rejection of potentially unreliable electronic products]. Moscow: New Knowledge; 2013. (In Russ.)
3. Piganov M.N. [Individual prediction of the quality of elements and components of micro-assemblies]. Moscow: New technologies; 2002. (In Russ.)
4. Gorlov M.I., Sergeev V.A. [Modern diagnostic methods of quality control and reliability of semiconductor products]. Ulyanovsk: UISTU; 2015. (In Russ.)
5. Robinson L. E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
6. Bipolar Power Transistor. Data Book 1998. *TEMIC Semiconductors*. 1997;12:35-42.

7. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Plebanovich V.I., Beresnevich A.I., Burak I.A. [An experimental study of the degradation of electronic products]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;2 (104):45-52. (In Russ.)
8. Borovikov S.M., Tsyrelchuk I.N., Shneiderov E.N., Beresnevich A.I. [*Predicting the reliability of electronic products*]. Minsk: MGVRK; 2010. (In Russ.)
9. Mishanov R.O., Piganov M.N. [Methodology for determining a set of informative parameters for individual prediction of the quality and reliability of radio electronic equipment]. *Nadejnost i kachestvo slojnih sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2017;17(1):93-103. (In Russ.)
10. Borovikov S.M., Beresnevich A.I., Khmyl A.A., Emelyanov A.V., Tsyrelchuk I.N. [Method for predicting the reliability of electronic products]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2006;50(4):105-109. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

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

Казючиц В.О., м.т.н., ассистент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Borovikov S.M., PhD, Associate Professor of the Information and Computer Systems Design Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kaziuchyts V.O., M.Sci, Assistant of the Information and Computer Systems Design Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Боровиков Сергей Максимович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Borovikov Sergei Maksimovich