

621.382.33–027.45

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ СРЕДСТВ МЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

С.М. БОРОВИКОВ, И.В. РУСАК

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Одним из способов обеспечения безотказности ответственных средств медицинской электроники является использование в их составе отобранных комплектующих элементов, отвечающих требованию надёжности. Применительно к полупроводниковым приборам для отбора могут быть использованы методы индивидуального прогнозирования класса работоспособности (работоспособные или неработоспособные) для заданной наработки по информативным параметрам приборов. Эти методы позволяют в начальный момент времени для готовых и прошедших выходной контроль полупроводниковых приборов по значениям их информативных параметров, измеряемым у каждого конкретного экземпляра (полупроводникового прибора), подсчитать прогнозирующую функцию и по её значению принять решение о классе работоспособности экземпляра, а далее отобрать те экземпляры, которые для заданной наработки с большой степенью вероятности будут принадлежать к классу работоспособных экземпляров. Интерес для практики представляют методы, в которых информативные параметры полупроводниковых приборов в начальный момент времени преобразуют в дискретный код (двоичный или троичный) и решение о классе работоспособности экземпляра принимают по набору дискретных сигналов без выполнения расчёта прогнозирующей функции. Для ответа на вопрос, как по набору кодовых сигналов принимать более достоверные решения, использовано статистическое имитационное моделирование информативных параметров полупроводниковых приборов.

**Ключевые слова:** медицинская аппаратура, надёжность, полупроводниковые приборы, преобразование информативных параметров в дискретный код, прогнозирование класса работоспособности.

## ENSURING RELIABILITY OF MEDICAL ELECTRONIC APPARATUS BY FORECASTING OF THE PERFORMANCE OF SEMICONDUCTOR DEVICES

SERGEI M. BOROVIKOV, ILIA V. RUSAK

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

**Abstract.** One of the methods to ensure failure-free operation of critical medical electronics is to use selected components that meet reliability requirements. As applied to semiconductor devices, methods of individual prediction of the performance class (operational or non-operational) for during operating time by using the informative parameters of the devices can be used for selection. These methods allow, at the initial moment of time, for finished semiconductor devices that have passed the final inspection, to calculate the predictive function based on the values of their informative parameters measured for each specific specimen (semiconductor device) and, based on its value, to make a decision on the performance class of the specimen, and then select those specimens that are highly likely to belong to the class of operational specimens for a given service life. Of practical interest are methods in which the informative parameters of semiconductor devices are initially converted into a discrete code (binary or ternary) and a decision on the performance class of the specimen is made based on a set of discrete signals without calculating the predictive function. To answer the question of how to make more reliable decisions based on a set of code signals, statistical simulation modeling of informative parameters of semiconductor devices was used.

**Keywords:** medical equipment, reliability, semiconductor devices, transformation of information parameters into discrete code, prediction of reliability class.

## Введение

Уровень надёжности средств медицинской электроники во многом определяется надёжностью используемых в их составе вторичных источников питания, безотказность которых в немалой степени зависит от качества (надёжности) используемых мощных полупроводниковых приборов. Полупроводниковые приборы (далее обобщённо изделия электронной техники – ИЭТ) требуемого уровня надёжности могут быть отобраны методами индивидуального прогнозирования по информативным параметрам, под которым понимают такой, обычно электрический параметр, значения которого в начальный момент времени для конкретного экземпляра несёт информацию о надёжности этого экземпляра для будущих моментов времени работы – наработки.

По результатам индивидуального прогнозирования решение о надёжности ИЭТ (конкретного экземпляра) принимают в виде отнесения его к одному из двух классов уровня надёжности для заданной наработки:

$K_1$  – класс работоспособных экземпляров;

$K_2$  – класс неработоспособных экземпляров (эти экземпляры с большой вероятностью откажут в составе электронного средства раньше момента окончания заданной наработки).

## Теоретический анализ

Решение о классе конкретного экземпляра для заданной наработки  $t_3$  принимают по значениям информативных параметров  $x_1, \dots, x_k$  этого экземпляра, используя модель прогнозирования, которую получают с помощью предварительных исследований (называемых обучающим экспериментом) интересующего типа ИЭТ, в следующем виде [1, 2]:

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

где  $j$  – означает конкретный экземпляр;  $k$  – число используемых информативных параметров (обычно  $k = 2 \dots 5$ );  $F[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}]$  – значение прогнозирующей функции, полученное расчётом для  $j$ -го экземпляра;  $P_0$  – порог разделения классов.

Причём, обучающий эксперимент включает исследования определённой выборки ИЭТ на надёжность в течение продолжительности, эквивалентной заданной наработке  $t_3$ .

Для прогнозирования класса однотипного экземпляра, не принимавшего участия в обучающем эксперименте, необходимо у этого экземпляра измерить информативные параметры  $x_1, \dots, x_k$ , подсчитать значение прогнозирующей функции  $F[\dots]$  и по модели (1) принять решение о классе работоспособности экземпляра по прогнозу для будущей наработки  $t_3$ . Необходимость выполнения сложных расчётов по определению прогнозирующей функции  $F[\dots]$ , входящей в модель (1), сдерживает и/или ограничивает применение этого вида индивидуального прогнозирования в практике.

## Характеристика моделей прогнозирования, использующих дискретный код

В работах [1-4] предложено: после измерения информативных параметров выполнять их преобразование в двоичный ( $z = 1$  либо  $z = 0$ ) или троичный ( $\tau = 1$ , либо  $\tau = 0$ , либо  $\tau = R$  – неопределённость) коды, используя пороговые уровни информативных параметров, найденные заранее по результатам обучающего эксперимента. Принцип преобразования в троичный код на примере электрического параметра  $U_{KЭнас}$  (напряжение коллектор-эмиттер) биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А иллюстрирует рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $m_1$  и  $m_2$  – средние значения (математические ожидания) информативного параметра, полученные для экземпляров соответственно классов  $K_1$  и  $K_2$  по результатам обучающего эксперимента;  $w(U_{KЭнас} | K_S)$  – гипотетическая условная плотность распределения электрического параметра  $U_{KЭнас}$  для класса  $S$  ( $S = 1$  или  $2$ ).

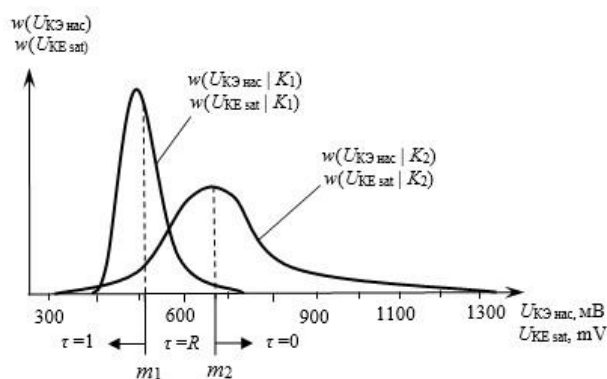


Рис. 1. Преобразование параметра  $U_{КЭнас}$  в троичный код

После выполнения преобразования в коды решение о классе работоспособности нового однотипного ИЭТ может приниматься без выполнения расчётов по комбинации двоичных или троичных сигналов, используя логические таблицы, пример которой соответствует табл. 1.

Таблица 1. Пример логической таблицы для экземпляров класса  $K_1$

Сочетание $\tau_i$			Значение $F$ , подсчитанное с использованием [5], дв. ед.	Сочетание $\tau_i$			Значение $F$ , подсчитанное с использованием [5] дв. ед.
$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$		$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	
1	1	1	11,066	1	R	R	3,338
1	1	R	6,769	0	1	1	2,992
1	R	1	7,636	1	0	1	4,187
R	1	1	7,098	1	1	0	3,383
R	R	1	3,668	R	0	1	0,219
R	1	R	2,801				–

Для получения логических таблиц предложено несколько моделей [5]. Актуальным является вопрос о том, какая из моделей обеспечивает более достоверные результаты прогнозирования. Использование для получения ответа обучающих экспериментов на конкретных типах ИЭТ не даст окончательный ответ на этот вопрос из-за ограниченного объёма используемых выборок. Предлагается изучить закономерности информативных параметров на ограниченных выборках (примерно объёмом до 200 экземпляров) конкретных типов ИЭТ, а затем выполнить статистическое имитационное моделирование обучающего эксперимента на компьютере.

### Экспериментальная часть

На примере экспериментальных данных биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А и полевых транзисторов большой мощности типа КП744А установлено, что для информативных параметров подтверждается гипотеза о трёхпараметрическом (смещённом) распределении Вейбулла [6] с параметрами  $a > 0$  – параметр масштаба,  $b > 0$  – параметр формы,  $c$  – параметр сдвига,  $x > c$ .

Количество экземпляров класса надёжных ( $K_1$ ) и потенциально ненадёжных ( $K_2$ ) ИЭТ принято:  $n_1 = 3000$ ,  $n_2 = 2000$ .

Моделирование информативных параметров для экземпляров обучающей и контрольных выборок выполнялось по следующему вычислительному алгоритму [2, 6]:

$$x = c + a[-\ln(1-r)]^{1/b}, \quad (2)$$

где  $r$  – случайные равномерно распределённые числа в диапазоне  $(0 \dots 1)$ .

На основе экспериментальных данных реальных обучающих экспериментов и подтверждения с использованием этих данных гипотез о распределении информативных параметров отдельно в каждом классе ( $K_1$  и  $K_2$ ) по трёхпараметрическому распределению Вейбулла были получены условия моделирования на компьютере информативных параметров (табл. 2).

**Таблица 2.** Условия моделирования информативных параметров биполярных транзисторов КТ872А

Параметр распределения Вейбулла	Информативный параметр для экземпляров класса $K_1$			Информативный параметр для экземпляров класса $K_2$		
	$x_1 \rightarrow h_{21Э}$	$x_2 \rightarrow I_{КБ0}$	$x_3 \rightarrow U_{КЭнас}$	$x_1 \rightarrow h_{21Э}$	$x_2 \rightarrow I_{КБ0}$	$x_3 \rightarrow U_{КЭнас}$
$a$	0,963	0,0889	112,8	0,719	0,062	330,8
$b$	3,684	4,569	1,310	2,754	2,109	1,430
$c$	2,717	0,123	421,3	2,529	0,182	400,7

*Примечания.* 1. Пояснение информативных параметров:

$h_{21Э}$  – статический коэффициент передачи тока,  $I_{КБ0}$  – обратный ток коллектора,  $U_{КЭнас}$  – напряжение насыщения коллектор-эмиттер.

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

## Заключение

Обоснована возможность обеспечения требуемой надёжности полупроводниковых приборов в составе средств медицинской электроники путём их отбора методом индивидуального прогнозирования класса работоспособности по информативным параметрам. Отмечаются ограничения при использовании моделей прогнозирования, получаемых классическим методом, описанным в литературе. Указываются достоинства методов, использующих преобразование информативных параметров в дискретные коды с принятием решения о классе работоспособности экземпляра по набору дискретных кодовых сигналов. Для определения лучшего способа формирования прогнозирующей функции, используемой для построения логических таблиц, применяемых для прогнозирования класса работоспособности экземпляров по комбинации (сочетанию) дискретных кодовых сигналов, изучены на основе экспериментальных данных (реальных обучающих экспериментов) закономерности информативных параметров ИЭТ. Установлено, что информативные параметры биполярных и полевых транзисторов большой мощности неплохо описываются трёхпараметрическим распределением Вейбулла. С учётом этого определены параметры распределения Вейбулла, используемые для статистического имитационного моделирования на компьютере обучающего эксперимента при объёме выборки, составляющей пять тысяч экземпляров. Такой большой объём выборки позволит более объективно, нежели экспериментальные данные малых объёмов выборок, оценить эффективность разных методов, используемых для построения логических таблиц.

## Список литературы

1. Боровиков С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники. М.: Новое знание; 2013.
2. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности. Минск: Дизайн ПРО; 1998.
3. Боровиков С.М., Казючиц В.О. Индивидуальное прогнозирование надёжности транзисторов большой мощности для электронных устройств медицинского назначения. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): С. 88-95. DOI: <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-88-95>.
4. Казючиц В.О., Боровиков С.М., Батура М.П., Шнейдеров Е.Н. Прогнозирование класса надёжности изделий электронной техники методом преобразования информативных параметров в дискретный код. Доклады ТУСУР. 2023; 26 (1): 91-97. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-91-97.
5. Боровиков С.М. Статистическое имитационное моделирование в исследовании эффективности моделей прогнозирования надёжности изделий по информативным параметрам = Statistical simulation modeling in the research of the effectiveness of models for predicting product reliability by informative parameters. BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics: сборник научных статей X Международной научно-практической конференции, Минск, 13 марта 2024 г.: в 2 ч. Ч. 2. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: В.А. Богуш [и др.]. Минск, 2024: 122-131.
6. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб: Наука; 2001.