

УДК 621.382.33–027.45

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ МЕТОДОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ТРОИЧНЫЙ КОД

С.М. Боровиков

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

**Аннотация.** Прогнозирование готовых и прошедших выходной контроль изделий электронной техники с точки зрения класса их надежности для заданной наработки может быть выполнено в начальный момент времени методами, использующими информативные параметры. Для целей практики интерес представляет прогнозирование с разделением выборки изделий для заданной наработки на два класса: класс надежных и класс потенциально ненадежных экземпляров. Для прогнозирования используют модели, которые получают заблаговременно с помощью предварительных исследований определенной выборки изделий интересующего типа. В классических методах прогнозирования (потенциальных функций, статистических решений), модель прогнозирования получают, используя непрерывные значения информативных параметров. Автором был предложен метод, в котором информативные параметры преобразовывают в двоичные или троичные кодовые сигналы, что упрощает получение модели прогнозирования, которая в конечном итоге может быть представлена простой логической таблицей, показывающей связь комбинаций кодовых сигналов с классом надежности изделия. На примере выборок мощных полевых транзисторов исследована эффективность моделей прогнозирования, получаемых новым методом.

**Ключевые слова:** информативные параметры; класс надежности изделий; индивидуальное прогнозирование надежности; достоверность прогнозирования.

## EFFICIENCY OF A MODEL FOR FORECASTING THE RELIABILITY OF ELECTRONIC PRODUCTS BY TRANSFORMING INFORMATIVE PARAMETERS INTO A TERNARY CODE

S.M. Borovikov

*Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Minsk, Belarus*

**Abstract.** Forecasting of finished and final-tested electronic products in terms of their reliability class for a given service life can be performed at the initial time using methods that use informative parameters. For practical purposes, forecasting with division of a sample of products for a given service life into two classes is of interest: a class of reliable and a class of potentially unreliable specimens. For forecasting, models are used that are obtained in advance using preliminary studies of a certain sample of products of the type of interest. In classical forecasting methods (potential functions, statistical solutions), the forecasting model is obtained using continuous values of informative parameters. The author proposed a method in which informative parameters are transformed into binary or ternary code signals, which simplifies obtaining a forecasting model, which can ultimately be represented by a logical table showing the relationship of code signal combinations with the reliability class of the product. Using samples of powerful field-effect transistors as an example, the efficiency of prediction models obtained by the new method is investigated.

**Keywords:** informative parameters; product reliability class; individual reliability forecasting; forecasting reliability.

### Введение

Применение методов прогнозирования с разделением выборки готовых изделий электронной техники на классы надежности для заданной наработки основано на измерении информативных параметров у конкретного экземпляра в начальный момент времени с последующей обработкой результатов измерений этих параметров [1] Для

практических применений интерес представляет разновидности метода, при использовании которых экземпляры интересующей выборки ИЭТ классифицируют с точки зрения работоспособности для заданной наработки на два класса:

– класс надежных экземпляров, которые для заданной наработки  $t_n$  сохраняют работоспособность (далее обозначен как класс  $K_1$ );

– класс потенциально ненадежных экземпляров, это те экземпляры, которые потеряют работоспособность раньше заданной наработки  $t_n$  по причине возникновения постепенного или внезапного отказа (далее класс обозначен через  $K_2$ ).

Решение о классе экземпляра принимают по модели прогнозирования

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

где  $j$  – символ, используемый для обозначения конкретного экземпляра;  $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$  – значения информативных параметров, измеренные для  $j$ -го экземпляра в момент времени  $t = 0$ ;  $k$  – количество используемых информативных параметров (обычно  $k = 2-5$ );  $F[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}]$  – значение прогнозирующей функции, подсчитанное для  $j$ -го экземпляра;  $P_0$  – порог разделения классов, определяемый экспериментально, исходя из условия лучшего разделения классов надежности ИЭТ обучающей выборки.

Модель прогнозирования (1) получают один раз с помощью предварительных исследования определенной выборки (примерно 30...100 экземпляров) ИЭТ интересующего типа. Эти исследования называют обучающим экспериментом, а исследуемую при этом выборку – обучающей. Полученную модель применяют для прогнозирования класса надежности других однотипных экземпляров, которые не использовались в обучающем эксперименте. Основу модели составляет прогнозирующая функция  $F$ , значение которой находят при прогнозировании конкретного экземпляра путем подстановки в нее результатов измерения информативных параметров  $x_1, \dots, x_k$  этого экземпляра.

### Основная часть

Интерес для практических применений представляет метод построения модели прогнозирования, основанный на принципах пороговой логики с преобразованием измеренных значений информативных параметров в троичные кодовые сигналы  $\tau$ , принцип получения которых иллюстрируется рис. 1 на примере электрического параметра  $U_{КЭнас}$  (напряжение насыщения коллектор-эмиттер) биполярных транзисторов большой мощности КТ872А.

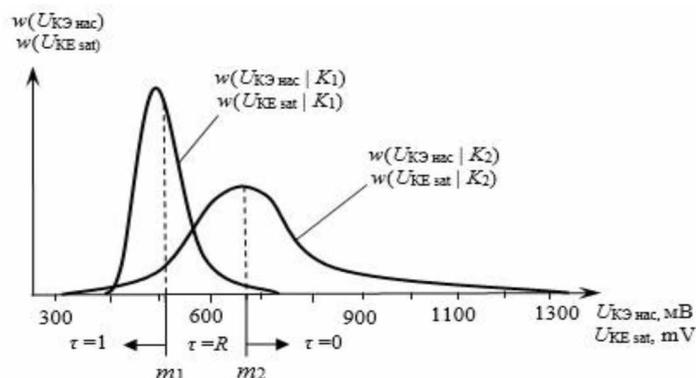


Рис. 1. Преобразование информативного параметра  $U_{КЭнас}$  в троичный код  
Fig. 1. Transformation of the informative parameter  $U_{КЭнас}$  into a ternary code

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $m_1, m_2$  – средние значения (математические ожидания) параметра  $U_{КЭнас}$  в начальный момент времени, полученные обработкой отдельно экземпляров классов  $K_1$  и  $K_2$  обучающей выборки ИЭТ;  $\tau$  – троичный кодовый сигнал.

Для области, находящейся между средними значениями информативного параметра в классах  $K_1$  и  $K_2$ , присваивается код  $\tau_i = R$  (от англ. Range – диапазон), означающий высокую степень неопределенности класса работоспособности рассматриваемого экземпляра (единицы ИЭТ). За пределами указанного диапазона от  $m_1$  до  $m_2$  код  $\tau_i = 1$  присваивается значениям информативного параметра, которые в основном соответствуют экземплярам класса  $K_1$ , код  $\tau_i = 0$  – экземплярам класса  $K_2$ .

Практический интерес представляет модель прогнозирования, в которой прогнозирующая функция строится с учетом понятия частная информация о принадлежности  $j$ -го экземпляра к классам  $K_1$  и  $K_2$ , содержащаяся в сообщении о том, что  $i$ -й троичный сигнал  $\tau_i$  для этого экземпляра принял конкретное значение  $\tau_i^{(j)} = \varepsilon$  ( $\varepsilon = 1$ , либо  $0$ , либо  $R$ ). В этом случае функция  $F^{(j)}$  модели (1) может быть представлена в виде [2]

$$F^{(j)}(\tau_1, \dots, \tau_k) = \sum_{i=1}^k \log_2 \left[ \frac{P(K_1 | \tau_i^{(j)})}{P(K_1)} \right] - \sum_{i=1}^k \log_2 \left[ \frac{P(K_2 | \tau_i^{(j)})}{P(K_2)} \right], \text{ дв. ед.}, \quad (2)$$

где  $j$  – индекс, означающий, что рассматриваемая величина относится к конкретному экземпляру ИЭТ;  $\tau_i^{(j)}$  – троичный кодовый сигнал, полученный для  $j$ -го экземпляра;  $P(K_1 | \tau_i^{(j)})$ ,  $P(K_2 | \tau_i^{(j)})$  – условная вероятность принадлежности экземпляра соответственно к классам  $K_1$  и  $K_2$  при условии, что в результате преобразования информативного параметра  $x_i^{(j)}$   $j$ -го экземпляра в кодированный сигнал  $\tau_i^{(j)}$  последний принял конкретное значение  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 1, 0, R$ );  $P(K_S)$  – начальная вероятность принадлежности любого экземпляра рассматриваемой выборки к классу  $K_S$  ( $S = 1, 2$ ).

Первая сумма выражения (2) представляет собой частную информацию, получаемую для  $j$ -го экземпляра от набора троичных кодовых сигналов  $\tau_1^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)}$  о классе  $K_1$ , а вторая (вычитаемое) – частную информацию о классе  $K_2$ . Результатом вычисления  $F^{(j)}$  по выражению (2) является число, показывающее, как выполнять прогноз класса работоспособности  $j$ -го экземпляра:

- а) при  $F^{(j)} \geq 0$  должно приниматься решение о классе  $K_1$ ;
- б) при  $F^{(j)} < 0$  должно приниматься решение о классе  $K_2$ .

Достоверность модели прогнозирования, использующей функцию (2), сравнивалась с моделями прогнозирования, получаемыми методом статистических решений (МСР) и методом потенциальных функций (МПФ) на примере полевых транзисторов большой мощности КП744А как группы ИЭТ.

Для получения моделей прогнозирования был выполнен обучающий эксперимент. Заданная нормированная наработка транзисторов, составляющая  $t_n = 80\,000$  ч для обычных нормальных условий работы, обеспечивалась проведением ускоренных форсированных испытаний по типовым методикам с использованием высокотемпературной и электрической нагрузок. Суммарный коэффициент ускорения испытаний имел значение  $K_y \approx 160$ . Объем обучающей выборки составлял 172 экземпляра, из которых для наработки  $t_n = 80\,000$  ч 79 экземпляров оказались работоспособными, следовательно, представителями класса  $K_1$ , а 93 экземпляра – представителями класса  $K_2$ .

В качестве критерия оценки эффективности моделей прогнозирования использована вероятность принятия правильных решений  $P_{\text{прав}}$  о классе надежности транзисторов для заданной наработки  $t_n$ .

В табл. 1 приведены условия получения кодовых сигналов, в табл. 2 – оценки условных вероятностей класса надежности, в табл. 3 – результаты эффективности рассматриваемых моделей прогнозирования.

Таблица 1. Условия получения кодовых сигналов  
Table 1. Conditions for creating code signals

Информативный параметр	Пояснение параметра	Условие получения троичного кодового сигнала		
		$\tau = 1$	$\tau = R$	$\tau = 0$
$U_{\text{зи.пор. В}}$	Пороговое напряжение затвор–исток В	$> 3.013$	$2.694 \leq U_{\text{зи.пор. В}} \leq 3.013$	$< 2.694$
$C_{\text{эс, пФ}}$	Емкость затвор–сток, пФ	$< 773,3$	$773,3 \leq C_{\text{эс}} \leq 795,2$	$> 795,2$
$C_{\text{зи, пФ}}$	Емкость затвор–исток, пФ	$< 462,3$	$462,3 \leq C_{\text{зи}} \leq 473,3$	$> 473,3$

Таблица 2. Оценки условных вероятностей класса надежности  
Table 2. Estimates of conditional probabilities of reliability class

Способ преобразования информативного параметра	Обозначение условной вероятности	Оценка условной вероятности для:		
		$x_1 \rightarrow U_{\text{зи.пор. В}}$	$x_2 \rightarrow C_{\text{эс}}$	$x_3 \rightarrow C_{\text{зи}}$
В троичные сигналы $\tau$ ,	$P(K_1   \tau_i = 1)$	0,927	0,900	0,920
	$P(K_1   \tau_i = 0)$	0,045	0,071	0,053
	$P(K_1   \tau_i = R)$	0,448	0,455	0,369
	$P(K_2   \tau_i = 1)$	0,073	0,100	0,080
	$P(K_2   \tau_i = 0)$	0,955	0,929	0,947
	$P(K_2   \tau_i = R)$	0,552	0,545	0,631

Таблица 3. Эффективность моделей прогнозирования  
Table 3. Performance of forecasting models

Описание прогнозирующей функции $F^{V1}$	Номер выражения функции $F^{V1}$ или источник	Значение порога $P_0$	Вероятность правильных прогнозов класса работоспособности. $P_{\text{прав}}$	
			Обучающая выборка	Контрольная выборка
Использование частной информации о классах $K_1$ и $K_2$	(2)	0 бит	0,913	0,906
МСП. гипотеза о нормальном распределении информативных параметров в классах $K_1$ и $K_2$	[1]	1	0,901	0,894
Метод потенциальных функций	[1]	0	0,890	0,888

### Заключение

Из табл. 3 следует, что модель прогнозирования, основанная на преобразования информативных параметров в троичный код, с использованием прогнозирующей функции, учитывающей частную информацию, содержащуюся в полученном наборе троичных сигналов, обеспечивает достоверность прогнозирования, не уступающую МСП (в предположении нормального распределения информативных параметров в классах надежности  $K_1$  и  $K_2$ ) и МПФ. Модель прогнозирования может быть представлена логической таблицей. При прогнозировании однотипных экземпляров

отпадает необходимость выполнения расчетов функции вида (2) для каждого прогнозируемого экземпляра.

### Список использованных источников

1. Боровиков С.М. (2013) *Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники*. Москва, Издательство «Новое знание».

2. Казючич В.О., Боровиков С.М., Батура М.П., Шнейдеров Е.Н. (2023) Прогнозирование класса надежности изделий электронной техники методом преобразования информативных параметров в дискретный код. *Доклады ТУСУР*. 26(1), 91–97.

### References

1. Borovikov S.M. (2013) *Statistical Forecasting for Rejection of Potentially Unreliable Electronic Products*. Moscow, New Knowledge Publishing House (in Russian).

2. Kaziuchyts V.O., Borovikov S.M., Batura M.P., Shneiderov E.N. (2023) Prediction of the class of reliability of electronic equipment by the method of converting informative parameters into a discrete code. *TUSUR reports*. 26(1). 91–97 (in Russian).

### Сведения об авторе

**Боровиков С.М.**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», bsm@bsuir.by.

### Information about the author

**Borovikov S.M.**, Cand. Sci. (Tech.), Associate professor of the Department of Information and Computer Systems Design, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", bsm@bsuir.by.