

УДК 621.3.019

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КЛАССА НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

С. М. БОРОВИКОВ, В. О. КАЗЮЧИЦ, И. В. РУСАК

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

E-mail: bsm@bsuir.by

**Аннотация.** Рассматривается применение статистического имитационного моделирования для исследования эффективности моделей, используемых в начальный момент времени ( $t = 0$ ) для индивидуального прогнозирования надёжности изделий электронной техники для заданной (будущей) наработки по значениям информативных параметров изделий при  $t = 0$ . Особенностью исследуемых моделей прогнозирования является наличие операции преобразования информативных параметров конкретного экземпляра в дискретный двоичный или троичный код с последующим принятием решения о классе надёжности экземпляра (класс надёжных или класс потенциально ненадёжных экземпляров) по набору двоичных или троичных кодовых сигналов, полученных для этого экземпляра. Статистическое имитационное моделирование использовано для генерирования на компьютере результатов обучающего эксперимента, представляющего собой таблицу с указанием номера экземпляра, значений его информативных параметров и класса экземпляра по результатам виртуальных испытаний, соответствующих с точки зрения надёжности изделий заданной наработке. Генерировалось три информативных параметра, объём обучающей выборки составлял 5000 экземпляров. Условия моделирования (генерирования на компьютере) значений информативных параметров выбраны с учётом законов их распределения, полученным отдельно для экземпляров обоих классов, используя обработку результатов реального обучающего эксперимента, выполненного для биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А. Эффективность интересующих моделей прогнозирования определена путём получения моделей с использованием смоделированного обучающего эксперимента и дальнейшего их применения для прогнозирования класса надёжности экземпляров четырёх, специально сгенерированных контрольных выборок, классы надёжности экземпляров которых для заданной наработки были известны.

**Abstract.** The article considers the application of statistical simulation modeling for studying the efficiency of models used at the initial moment of time ( $t = 0$ ) for individual forecasting of reliability of electronic products for a given (future) operating time based on the values of informative parameters of products at  $t = 0$ . The peculiarity of the studied forecasting models is the presence of an operation of converting the informative parameters of a specific instance into a discrete binary or ternary code with subsequent decision-making on the reliability class of the instance (the class of reliable or the class of potentially unreliable instances) based on a set of binary or ternary code signals obtained for this instance. Statistical simulation modeling is used to generate on a computer the results of a training experiment, which is a table indicating the instance number, the values of its informative parameters and the instance class based on the results of virtual tests corresponding to a given operating time from the point of view of product reliability. Three informative parameters were used; the volume of the training sample was 5000 instances. The conditions for modeling (generating on a computer) the values of informative parameters were selected taking into account the laws of their distribution, obtained separately for instances of both classes, using the processing of the results of a real training experiment performed for high-power bipolar transistors of the KT872A type. The efficiency of the forecasting models of interest was determined by obtaining models using a simulated training experiment and their subsequent application for forecasting class of the reliability of instances of four specially generated control samples, class of the reliability of instances of which for a given operating time were known.

### Введение

Одним из подходов к обеспечению повышенной надёжности ответственных электронных устройств является отбор и использование в составе устройств экземпляров (образцов) изделий электронной техники (ИЭТ), отвечающих требованию надёжности. В инженерной практике находят применение методы прогнозирования надёжности, основанные на использовании информативных параметров ИЭТ. Эти методы позволяют в начальный момент времени для интересующего типа ИЭТ, используя заранее полученную модель прогнозирования, разделить выборку (партию) готовых изделий, прошедших выходной контроль и признанных годными для поставки потребителю, на два класса:

$K_1$  – класс надёжных экземпляров для заданной наработки  $t_3$ ;

$K_2$  – класс потенциально ненадёжных экземпляров для наработки  $t_3$ .

Потенциально ненадёжные экземпляры – это такие экземпляры, которые с большой вероятностью откажут раньше заданной наработки  $t_3$  из-за наличия в них скрытых дефектов, не выявленных производственным контролем при изготовлении ИЭТ.

### Актуальность исследований

Разделение в начальный момент времени выборки ИЭТ на два класса надёжности выполняют путём контроля информативных параметров у каждого экземпляра выборки. Для принятия в начальный момент времени решения о классе экземпляра, к которому он будет принадлежать для интересующей заданной наработки  $t_3$ , используют модель прогнозирования, в которую подставляют значения информативных параметров прогнозируемого экземпляра. Модель получают заранее, исследуя на надёжность часть экземпляров той выборки однотипных ИЭТ, для которой в дальнейшем будет выполняться прогнозирование класса надёжности для наработки  $t_3$ . Эту часть выборки называют обучающей, её объём составляет примерно 30...100 экземпляров. Исследования на надёжность экземпляров обучающей выборки (эти исследования называют обучающим экспериментом) выполняют, используя ускоренные испытания в течение времени, эквивалентном заданной наработке  $t_3$ . Модель прогнозирования получают в виде [1]

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

где символ  $j$  означает конкретный экземпляр;  $x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$  – значения информативных параметров  $j$ -го экземпляра;  $F[\dots]$  – прогнозирующая функция, подсчитанная для  $j$ -го экземпляра;  $k$  – число информативных параметров, используемых для индивидуального прогнозирования класса надёжности (обычно  $k = 2 \dots 5$ );  $P_0$  – порог разделения классов, выбираемый экспериментально из условия лучшего разделения на классы экземпляров обучающей выборки.

Полученную модель (1) применяют для прогнозирования класса однотипных экземпляров, не принимавших участия в обучающем эксперименте. Эта процедура включает измерение информативных параметров  $x_1, \dots, x_k$  у прогнозируемого экземпляра, подсчёт значения прогнозирующей функции  $F[\dots]$  и принятие по (1) решения о классе надёжности экземпляра по прогнозу для будущей наработки  $t_3$ . Необходимость выполнения сложных расчётов по определению прогнозирующей функции  $F[\dots]$ , входящей в (1), ограничивает, а во многих случаях сдерживает применение рассматриваемого вида индивидуального прогнозирования в инженерной практике.

Интерес представляют методы, в которых информативные параметры экземпляра (ИЭТ) преобразуют в дискретный двоичный [1–3] или троичный [4] коды. В этих методах модель прогнозирования класса надёжности экземпляров, не принимавших участия в предварительных исследованиях, может быть представлена логической таблицей, показывающей, какой комбинации двоичных или троичных кодовых сигналов соответствуют по прогнозу экземпляры, например класса  $K_1$ .

Возникает вопрос об эффективности методов, основанных на преобразовании информативных параметров в кодовые сигналы. В качестве показателя эффективности метода прогнозирования можно использовать вероятность принятия правильных решений  $P_{\text{прав}}$  в предположении применения (1) к экземплярам обучающей выборки, действительный класс которых для наработки  $t_3$  известен по результатам обучающего эксперимента. Использование обучающих выборок из-за их ограниченного объёма (обычно не более 100...200 экземпляров) не позволяет получить аргументированный ответ на этот вопрос. Ответ на указанный вопрос можно получить, используя обучающую выборку очень большого объёма и статистическое имитационное моделирование обучающего эксперимента на компьютерной технике. Целью данной работы является определение эффективности моделей, использующих преобразование информативных параметров в дискретные коды для прогнозирования класса надёжности ИЭТ, и их сравнение с моделями, получаемыми методом статистических решений [1].

### Методика исследования

Для получения ответа на вопрос об эффективности моделей прогнозирования, использующих преобразование информативных параметров в дискретные коды, экспериментально исследованы закономерности информативных параметров ИЭТ для классов надёжности  $K_1$  и  $K_2$  на примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А и с учётом этого выбраны условия генерирования информативных параметров при статистическом имитационном моделировании на компьютере обучающего эксперимента. Использование компьютерной техники предоставляет возможность генерировать обучающую выборку, включающую тысячи экземпляров каждого класса ( $K_1$  и  $K_2$ ).

Результаты обучающего эксперимента, смоделированного на компьютере, были использованы для получения моделей прогнозирования для случаев преобразования информативных параметров как в двоичные (1 и 0), так и троичные (1, 0, R) кодовые сигналы, где код «1» характеризует близость экземпляра к классу  $K_1$ , код «0» – близость к классу  $K_2$ , а код «R» означает неопределённость класса экземпляра. Полученные модели прогнозирования были применены для прогнозирования экземпляров обучающей выборки (5000 экземпляров) и четырёх контрольных выборок, каждая объёмом также 5000 экземпляров. Количество экземпляров класса надёжных ( $n_1$ ) и потенциально ненадёжных ( $n_2$ ) для выборок:  $n_1 = 3000$ ,  $n_2 = 2000$ . Действительный класс

экземпляров контрольных выборок был известен до процедуры применения моделей прогнозирования. Путём сравнения прогнозного класса экземпляра с действительным классом были определены вероятности принятия правильных решений  $P_{\text{прав}}$  для моделей прогнозирования, основанных на использовании прогнозирующих функций, получаемых с использованием разных подходов: классического метода статистических решений [1] и с использованием преобразования информативных параметров в двоичный [1–3] и троичный [4] коды.

### Результаты эффективности моделей

Пояснение информативных параметров, используемых для биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А, размерность параметров и режим их измерения приведены в таблице 1. Обозначения параметров электрического режима, принятые в этой таблице:  $U_{КЭ}$ ,  $U_{КБ}$  – напряжение коллектор-эмиттер и напряжение коллектор-база;  $I_B$ ,  $I_K$  – ток базы и ток коллектора.

**Таблица 1.** Информация об информативных параметрах

Обозначение информативного параметра	Пояснение	Размерность	Режим измерения
$x_1 \rightarrow h_{21Э}$	Статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером	–	$U_{КЭ} = 5 \text{ В};$ $I_K = 7 \text{ А}$
$x_2 \rightarrow I_{КБ0}$	Обратный ток коллектора при разомкнутом выводе эмиттера	мкА	$U_{КБ} = 500 \text{ В}$
$x_3 \rightarrow U_{КЭнас}$	Напряжение насыщения коллектор-эмиттер	мВ	$I_B = 3,5 \text{ А};$ $I_K = 7 \text{ А}$

Анализируя экспериментальные данные результатов обучающего эксперимента (на примере транзисторов КТ872А), установлено, что для описания распределения информативных параметров, рассматриваемых отдельно для экземпляров классов  $K_1$  и  $K_2$ , «не работает» гипотеза о нормальном распределении. Информативные параметры в классах  $K_1$  и  $K_2$  неплохо описываются трёхпараметрическим распределением Вейбулла-Гнеденко, согласно которому модель плотности распределения информативного параметра (обозначен через  $x$ ) в каждом классе имеет вид [5]

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} \frac{b}{a} \left( \frac{x-c}{a} \right)^{b-1} \exp \left[ - \left( \frac{x-c}{a} \right)^b \right] & \text{для } x > c \\ 0 & \text{для } x \leq c, \end{cases} \quad (2)$$

где  $a > 0$  – параметр масштаба;  $b > 0$  – параметр формы;  $c$  – параметр сдвига,  $x > c$ .

Используя результаты реального обучающего эксперимента, для (2) получены параметры  $a$ ,  $b$  и  $c$  для классов надёжности  $K_1$  и  $K_2$  для случая трёх информативных параметров, указанных в таблице 1. С учётом этого выбраны условия генерирования при статистическом имитационном моделировании информативных параметров, соответствующих экземплярам классов  $K_1$  и  $K_2$  (таблица 2).

**Таблица 2.** Условия моделирования информативных параметров

Параметр распределения Вейбулла-Гнеденко	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

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

Генерирование информативных параметров для обучающей и контрольных выборок выполнялось по следующему вычислительному алгоритму:

$$x = c + a[-\ln(1-r)]^{1/b}, \quad (3)$$

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

В таблице 3 приведены значения  $P_{\text{прав}}$ , полученные для обучающей выборки, и средние значения  $P_{\text{прав}}$  – по результатам применения исследуемых моделей к четырём контрольным выборкам.

**Таблица 3.** Эффективность моделей прогнозирования

Описание прогнозирующей функции $F$ в (1), ссылка на источник	Значение порога $P_0$ в (1)	Вероятность $P_{\text{прав}}$ для выборки	
		обучающей	контрольной
Преобразование информативных параметров в дискретные кодовые сигналы			
Сумма весовых коэффициентов двоичных кодовых сигналов [1–3]	1,704	0,8818	0,8803
Сумма весовых коэффициентов кодовых сигналов 1, 0 и R [4]	1,428	0,9246	0,9151
Метод статистических решений			
Логарифм отношения правдоподобия с использованием гипотезы о нормальном распределении информативных параметров в классах $K_1$ и $K_2$ [1]	0	0,9132	0,9116
Логарифм отношения правдоподобия с использованием гипотезы о распределении информативных параметров в классах $K_1$ и $K_2$ по закону Вейбулла-Гнеденко [5]	0	0,9136	0,9062

### Заключение

Применение в практике описанных в [1–4] моделей прогнозирования класса надёжности ИЭТ для заданных наработок, основано на преобразовании информативных параметров в дискретный код. Модели прогнозирования в этих случаях могут быть представлены логическими таблицами, показывающими, как по набору (комбинации) двоичных или троичных сигналов принять решение о классе экземпляра, к которому по прогнозу он будет принадлежать для заданной наработки. Но возникает вопрос о качестве прогнозирования с помощью таких моделей. Для получения достоверного ответа на этот вопрос использовано статистическое имитационное моделирование обучающего эксперимента, включающее генерирование информативных параметров, соответствующих классам надёжных ( $K_1$ ) и потенциально ненадёжных ( $K_2$ ) экземпляров. Условия моделирования получены на основе анализа результатов реального обучающего эксперимента, выполненного для биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А. На примере смоделированных обучающей и четырёх контрольных выборок большого объёма (5000 экземпляров каждая) сделана оценка и сравнение по вероятности принятия правильных прогнозов моделей, использующих преобразование информативных параметров в дискретный код, и моделей, получаемых методом статистических решений.

Установлено, что модель, использующая преобразование информативных параметров в троичный код (1, 0 и R – неопределённость) обеспечивает лучшие результаты прогнозирования для контрольных выборок. Модель прогнозирования, получаемая методом статистических решений в предположении распределения информативных параметров по закону Вейбулла-Гнеденко, уступает ей по эффективности. Объясняется это тем, что для некоторых экземпляров выборок нарушается условие  $x > c$  и, как следствие, используя (2), не удаётся получить отношение правдоподобия, что вынуждает отказаться от прогнозирования класса надёжности таких экземпляров, а это в условиях инженерной практики равносильно отнесению экземпляра к классу потенциально ненадёжных экземпляров.

### Список использованных источников

1. Боровиков С. М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники: монография. М.: Новое знание, 2013. – 343 с.
2. Боровиков С. М. Метод прогнозирования надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков, А. В. Емельянов, А. А. Хмыль, А. И. Бересневич // Доклады НАН Беларуси, 2006, Т. 50, № 4. – С. 105-109.
3. Боровиков С. М. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники методом пороговой логики / С. М. Боровиков, А. И. Бересневич, А. А. Хмыль, А. В. Емельянов, И. Н. Цырельчук // Доклады БГУИР, 2006, № 2(14). – С. 49-56.
4. Казючиц В. О. Прогнозирование класса надёжности изделий электронной техники методом преобразования информативных параметров в дискретный код / В. О. Казючиц, С. М. Боровиков, М. П. Батура, Е. Н. Шнейдеров // Доклады ТУСУР, 2023, Т. 26, № 1. – С. 91-97.
5. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров распределения Вейбулла. ГОСТ 11.007–75, Москва, 1980. – 30 с.