УДК 621.382

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ

Боровиков С.М., Будник А.В., Русак И.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, iliaru756@gmail.com

Аннотация: на примере транзисторов КТ872А установлены законы распределения информативных параметров отдельно для классов надёжных (K_1) и потенциально ненадёжных (K_2) экземпляров для нормированной наработки и определены условия моделировании на компьютере обучающей выборки большого объёма. По результатам моделирования получены модели прогнозирования класса надёжности транзисторов тремя методами. Применением моделей к обучающей и четырём контрольным выборкам, включающим по 20 тыс. экземпляров каждая, определена эффективность методов по критерию Байеса. Установлено, что метод с использованием преобразования информативных параметров в троичный код не уступает по эффективности методу потенциальных функций, рекомендованному отраслевым стандартом, но является более простым и понятным для специалистов, легко может быть автоматизирован для использования на входном контроле при отборе надёжных элементов.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, надёжность, прогнозирование, статистическое моделирование, входной контроль.

I. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение требуемого уровня надёжности радиоэлектронной аппаратуры является одной из приоритетных задач радиоэлектроники. Одним из подходов к обеспечению высокой надёжности радиоэлектронных устройств является отбор на входном контроле элементов, отвечающих требованию надёжности. Для выполнения отбора могут быть использованы методы индивидуального прогнозирования надёжности по значениям информативных параметров элементов в начальный момент времени. В этом случае решение об уровне надёжности экземпляра (единицы элемента) для заданной наработки принимают в виде отнесение его по результатам измерения информативных параметров к одному из двух классов надёжности: K_1 – класс надёжных экземпляров, K_2 – класс потенциально ненадёжных экземпляров. Потенциально ненадёжные экземпляры – это такие экземпляры, которые прошли выходной контроль на предприятии, изготавливающим элементы, и признаны годными для поставки потребителю, однако с большой вероятностью могут отказать раньше заданной (нормированной) наработки t_3 из-за наличия в них скрытых дефектов, не выявленных производственным контролем при изготовлении элементов. Для принятия решения о классе экземпляра (элемента) для заданной будущей наработки используют модель прогнозирования, которая может быть получена разными методами. В технической литературе описывается несколько методов получения моделей прогнозирования [1]. Заслуживает внимания и отраслевой стандарт [2], который рекомендует для использования в промышленности метод потенциальных функций. Однако метод потенциальных функций является сложным для восприятия специалистами промышленности даже среднего звена и, кроме того, вызывает определённые проблемы при его автоматизации.

Относительно простыми и легко поддающимися автоматизации являются методы с использованием преобразования информативных параметров в дискретных код (двоичный или троичный) с принятием решение о классе надёжности экземпляра по полученному для него набору двоичных (единица и нуль) или троичных (единица, нуль или R – неопределённость) кодовых значений. Актуальным является вопрос, как по эффективности прогнозирования класса надёжности для заданной наработки соотносятся эти методы с методом потенциальных функций.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методы прогнозирования класса надёжности для заданной наработки путём контроля в начальный момент времени информативных параметров в радиоэлектронике получили признание для изделий электронной техники (ИЭТ). 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 $t_з$. Эту часть выборки называют обучающей [1]. Исследования на надёжность экземпляров обучающей выборки называют обучающим экспериментом. Его выполняют, используя ускоренные испытания в течение времени, эквивалентном заданной наработке $t_з$. Модель прогнозирования получают в виде [1]:

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

где символ j означает конкретный экземпляр; $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ – значения информативных параметров j-го экземпляра; $F\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right]$ – прогнозирующая функция, подсчитанная для j-го экземпляра; k – число информативных параметров, используемых для индивидуального прогнозирования класса надёжности (обычно k = 2…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, …, x_k у прогнозируемого экземпляра, подсчёт значения прогнозирующей функции $F\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right]$ и принятие по (1) решения о классе надёжности экземпляра по прогнозу для будущей наработки $t_з$. Необходимость выполнения сложных расчётов по определению прогнозирующей функции $F\left[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}\right]$, 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 двоичный код (единица или нуль [1, 3] или троичный код (единица, нуль или R–неопределённость [4–6] и метод потенциальных функций [1, 2]. В первых двух методах модель прогнозирования класса надёжности экземпляров, не принимавших участия в обучающем эксперименте, может быть представлена логической таблицей, показывающей, какой комбинации двоичных или троичных кодовых значений (сигналов) соответствуют по прогнозу экземпляры, например класса K_1.

Возникает вопрос об эффективности указанных методов. В качестве показателя эффективности метода прогнозирования использован Критерий Байеса, представляющий в данном случае вероятность принятия правильных решений $P_{прав}$ в предположении применения модели (1) к экземплярам обучающей и/или контрольной выборок, действительный класс которых для наработки $t_з$ известен по результатам обучающего эксперимента. При использовании реального обучающего эксперимента объём обучающей и контрольных выборок для ИЭТ ограничен, обычно более 100…200 экземпляров. Из-за ограниченных объёмов используемых выборок возникает вопрос о достоверности оценки эффективности методов. Ответ на указанный вопрос можно получить, имея обучающую выборку большого объёма, получаемую статистическим имитационным моделированием обучающего эксперимента, используя возможности компьютерной техники.

Для получения ответа на вопрос об эффективности моделей прогнозирования, получаемых рассматриваемыми методами, экспериментально на примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А исследованы закономерности информативных параметров отдельно для классов надёжности K_1 и K_2 и с учётом этого выбраны условия генерирования информативных параметров при статистическом имитационном моделировании на компьютере обучающего эксперимента большого объёма (20 тыс. экземпляров). Пояснение информативных параметров транзисторов КТ872А: $h_{21э}$ – статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером, $I_{КБО}$ – обратный ток коллектора, $U_{КЭнас}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер

Анализируя экспериментальные данные результатов обучающего эксперимента, установлено, что для описания распределения информативных параметров, рассматриваемых отдельно для экземпляров классов K_1 и K_2, не подтверждается гипотеза о нормальном распределении. Установлено, что информативные параметры в классах K_1 и K_2 неплохо описываются смещённым трёхпараметрическим распределением Вейбулла-Гнеденко, в соответствии с которым плотность распределения информативного параметра (обозначен через x) в каждом классе имеет следующий вид [7]:

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

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 использования трёх информативных параметров. С учётом этого выбраны условия генерирования при статистическом имитационном моделировании информативных параметров, соответствующих экземплярам классов K_1 и K_2 (табл. 1).

Таблица 1. Условия генерирования информативных параметров

Параметр распределения Вейбулла-Гнеденко	Информативный параметр для экземпляров класса K_1			Информативный параметр для экземпляров класса K_2		
	$x_1 \to h_{21Э}$	$x_2 \to I_{КБО}$	$x_3 \to U_{КЭнас}$	$x_1 \to h_{21Э}$	$x_2 \to I_{КБО}$	$x_3 \to U_{КЭнас}$
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 с распределения Вейбулла-Гнеденко, указанные в табл. 1, являются размерными. Их размерность: для $I_{КБО}$ – мкА, для $U_{КЭнас}$ – мВ.

Генерирование на компьютере информативных параметров (обозначен через *x*) выполнялось отдельно для экземпляров классов K_1 и K_2, с учётом условий моделирования, указанных в табл. 1, используя вычислительный алгоритм [7]:

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

где *r* – числа стандартной равномерной последовательности: числа, распределённые равномерно в интервале (0…1).

Объём обучающей выборки был выбран равным 20 тыс. экземпляров, из них 12 тыс. были представителями класса K_1, а 8 тыс. экземпляров – представителями класса K_2.

Используя результаты обучающего эксперимента, смоделированного на компьютере, были получены модели прогнозирования вида (1) для исследуемых методов. В случае преобразования информативных параметров в двоичный код для каждого из них использовались пороговые уровни, выбор которых описан в [1]. Причём код «1» присваивался той области информативного параметра, которая в основном отвечала экземплярам обучающей выборки класса K_1, а код «0» – экземплярам класса K_2. Кодовое значение *R*–неопределённость в случае преобразования рассматриваемого информативного параметра в троичный код присваивалось области, находящейся между средними значениями этого информативного параметра, соответствующими экземплярам классов K_1 и K_2 обучающей выборки. Для метода потенциальных функций по результатам обучающего эксперимента определялись потенциалы каждого из экземпляров, используя подходы, описанные в [1, 2].

Применяя полученные модели прогнозирования для экземпляров обучающей выборки объёмом 20 тыс. экземпляров, а также к четырём контрольным выборкам, каждая из которых включала тоже по 20 тыс. экземпляров, была определена вероятность принятия правильных решений по результатам прогнозирования $P_{прав}$. С подходом определения $P_{прав}$ можно ознакомиться в [1].

В табл. 2 приведены значения $P_{прав}$, полученные для обучающей выборки, и средние значения $P_{прав}$ – по результатам применения исследуемых моделей к четырём контрольным выборкам.

Таблица 2. Эффективность исследуемых моделей прогнозирования по критерию Байеса

Особенность метода и описание прогнозирующей функции *F*, ссылка на источник	Значение порога P_0	Вероятность $P_{прав}$ для выборки	
		обучающей	контрольной
Преобразование в двоичный код, *F* – сумма вероятностей принадлежности экземпляра к классу K_1 [1,3]	1,62	0,8918	0,8873
Преобразование в троичный код, *F* – суммарная частная информации о классе надёжности прогнозируемого экземпляра [4–6]	0 дв. единиц	0,9326	0,9283
Метод потенциальных функций, *F* – суммарный потенциал прогнозируемого экземпляра [1, 2]	0	0,9352	0,9305

Тенденции эффективности исследуемых методов прогнозирования, указанные в табл. 2, подтверждались и для других типов биполярных, а также полевых транзисторов.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод потенциальных функций и метод с использованием преобразования информативных параметров в троичный код обеспечивают более высокую эффективность прогнозирования по критерию Байеса (максимума вероятности принятия правильных решений по результатам индивидуального прогнозирования класса надёжности ИЭТ для заданной наработки). Сравнительный анализ методов показал, что использование модели прогнозирования с преобразованием информативных параметров в троичный код [4–6] практически не уступает по эффективности методу потенциальных функций, рекомендованному отраслевым стандартом [2] для использования в промышленности, но является более простым и понятным для специалистов, легко может быть автоматизирован для применения на входном контроле предприятий, изготавливающих ответственную электронную аппаратуру, для отбора экземпляров изделий электронной техники, отвечающих требованиям по надёжности.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводились на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в рамках выполнения НИР ГБ №26-2020 «Методология моделирования информационно-компьютерных систем».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Боровиков, С. М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники: монография / С. М. Боровиков. М.: Новое знание. 2013. 343 с.
[2] ГОСТ 4 ГО 012.007–70 Узлы функциональные. Метод индивидуального прогнозирования надёжности. М.: Изд-во ЦКБ, 1971. 36 с.
[3] 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.
[4] 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] Боровиков, С. М. Определение эффективности моделей прогнозирования надёжности полупроводниковых приборов методом статистического имитационного моделирования / С. М. Боровиков, А. В. Будник, И. В. Русак // Современные средства связи: материалы XXIX Международной научно-технической конференции. Минск, 31 октября – 1 ноября 2024 г. Минск: БГАС, 2024. С. 27–29.
[6] Боровиков, С. М. Сравнение по критериям Байеса и Неймана-Пирсона моделей прогнозирования надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков // Технические средства защиты информации: материалы XXIV Международной научно-технической конференции. Минск, 8 апреля 2026 года. Минск, 2026. С. 163–166.
[7] Вадзинский, Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. СПб: Наука, 2001. 295 с.

EFFECTIVENESS OF RELIABILITY PREDICTION MODELS FOR ELECTRONIC COMPONENTS TO AUTOMATE INCOMING INSPECTION PROCESSES

S. Borovikov, A. Budnik, I. Rusak

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
iliaru756@gmail.com

Abstract: using KT872A transistors as a case study, the distribution laws for informative parameters were established separately for classes of reliable (*K*1) and potentially unreliable (*K*2) units at a normalized operating time, and conditions were defined for the computer simulation of a large-scale training dataset. Based on the simulation results, models for predicting transistor reliability classes were developed using three different methods. By applying these models to the training set and four test sets—each comprising 20,000 units—the effectiveness of the methods was evaluated using the Bayes criterion. It has been established that the method based on converting informative parameters into a ternary code is no less effective than the potential functions method recommended by the industry standard; however, it is simpler and more intuitive for specialists and can be easily automated for use in incoming inspection when selecting reliable components.

Keywords: semiconductor devices, reliability, forecasting, statistical modeling, incoming inspection.