

УДК 004.942:62 -9-027.45

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.В. РУСАК

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П.Бровки, 6*

**Аннотация.** Рассмотрение применения статистического имитационного моделирования для исследования эффективности моделей прогнозирования надёжности полупроводниковых приборов для заданной наработки по результатам контроля информативных параметров полупроводниковых приборов в начальный момент времени. Особенностью исследуемых моделей прогнозирования является преобразование информативных параметров в дискретный двоичный или троичный код. Модели получены с помощью обработки данных обучающего эксперимента большого объёма, смоделированного на компьютере, а эффективность моделей определена путем их применения к экземплярам обучающей выборки, так и к экземплярам смоделированных контрольных выборок.

**Ключевые слова:** информативные параметры, преобразование в кодовые сигналы, класс надёжности полупроводниковых приборов, модели прогнозирования.

## DETERMINING THE EFFICIENCY OF RELIABILITY PREDICTION MODELS FOR SEMICONDUCTOR DEVICES BY STATISTICAL SIMULATION MODELING

I.V. RUSAK

*Educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki st., 6*

**Abstract.** Consideration of the application of statistical simulation modeling for studying the efficiency of models for predicting the reliability of semiconductor devices for a given service life based on the results of monitoring the informative parameters of semiconductor devices at the initial moment of time. A feature of the studied forecasting models is the transformation of informative parameters into a discrete binary or ternary code. The models were obtained by processing the data of a large-volume training experiment simulated on a computer, and the efficiency of the models was determined by applying them to both training sample instances and simulated control sample instances.

**Keywords:** informative parameters, conversion into code signals, reliability class of semiconductor devices, forecasting models.

### Введение

Решение о надёжности полупроводниковых приборов при использовании информативных параметров, контролируемых в начальный момент времени, принимают в виде отнесения прогнозируемого изделия (конкретного используемого экземпляра) к одному из двух классов с точки зрения работоспособности (надёжности) этого экземпляра для заданной наработки (времени работы)  $t_n$ :

–  $K_1$  – класс работоспособных экземпляров (экземпляров повышенного уровня надёжности);

–  $K_2$  – класс неработоспособных экземпляров (потенциально ненадёжных экземпляров).

Практика показала, что использование одного информативного параметра может привести к значительным ошибкам прогнозирования в виде «перепутывания» по результатам индивидуального прогнозирования номера класса экземпляров, к которому они в действительности будут принадлежать на момент наработки  $t_n$ . Поэтому для прогнозирования используют несколько информативных параметров. Их число в основном выбирают в диапазоне  $k = 2 \dots 5$ . Совокупность

информативных параметров, измеренная в начальный момент времени у конкретного экземпляра (в последствии будем называть его  $j$ -м экземпляром) создаёт образ этого экземпляра. Задача индивидуального прогнозирования в этом случае состоит в том, чтобы правильно распознать образ, т.е. верно указать класс ( $K_1$  или  $K_2$ ), к которому для интересующей наработки  $t_n$  будет принадлежать экземпляр  $j$ . Поэтому методы индивидуального прогнозирования надёжности полупроводниковых приборов по их информативным параметрам известны также как методы «распознавания образов». Для выполнения индивидуального прогнозирования класса полупроводниковых приборов для заданной наработки  $t_n$  нужно располагать моделью прогнозирования. Её получают, используя предварительные экспериментальные исследования на надёжность некоторой выборки изделий интересующего типа. Эти исследования называют обучающим экспериментом.

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

где символ  $j$  означает конкретный экземпляр;  $F_j[...]$  – прогнозирующая функция, подсчитанная для  $j$ -го экземпляра;  $P_0$  – порог разделения классов, выбираемый экспериментально из условия лучшего разделения на классы экземпляров обучающей выборки.

Полученную модель вида (1) применяют к однотипным экземплярам, не принимавшим участия в обучающем эксперименте. Известные методы прогнозирования, такие как метод статистических решений, метод потенциальных функций и некоторые другие являются сложными как для понимания, так и для автоматизации процедуры прогнозирования [1]. Известно, что непрерывные отчёты информативных параметров в полупроводниковых приборах в определенной степени содержат избыточное количество информации о классе работоспособности экземпляра для интересующей наработки  $t_n$ . С учётом этого представилось возможным перейти на двоичное представление информативных параметров. Используя принципы пороговой логики, модель прогнозирования можно получить в виде логической таблицы, показывающей какой комбинации двоичных сигналов соответствует тот или иной класс работоспособности полупроводниковых приборов.

### Методика проведения эксперимента

Условия моделирования, указанные в таблице 1, получены с учётом экспериментальных данных реального обучающего эксперимента и подтверждения с использованием этих экспериментальных данных гипотез о распределении информативных параметров отдельно в каждом классе ( $K_1$  и  $K_2$ ) по трёхпараметрическому распределению Вейбулла. Условия моделирования информативных параметров биполярных транзисторов типа КТ872А представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Условия моделирования информативных параметров биполярных транзисторов типа 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                       |

В качестве параметров информационных параметров использовались:  $h_{21Э}$  – статический коэффициент передачи тока,  $I_{КБ0}$  – обратный ток коллектора,  $U_{КЭнас}$  – напряжение насыщения коллектор-эмиттер. Параметры  $a$  и  $c$  распределения Вейбулла являются размерными. В данном случае размерность: для  $I_{КБ0}$  – мкА, для  $U_{КЭнас}$  – мВ. По экспериментальным данным транзисторов КП744А получены параметры  $a$ ,  $b$  и  $c$  распределения в классах работоспособности  $K_1$  и  $K_2$  для трёх используемых информативных параметров и с учётом этого выбраны условия их моделирования в обучающем эксперименте для экземпляров обучающей выборки (5000 экземпляров) и экземпляров четырёх контрольных выборок объёмом 5000 каждая. В качестве примера в таблице 2 приведены условия моделирования для этого типа транзисторов. В качестве размерностей параметров  $a$  и  $c$ : для  $U_{ЗИ.пор}$  – В, для  $C_{ЗС}$  и  $C_{ЗИ}$  – пФ.

**Таблица 2.** Условия моделирования информативных параметров

| Параметр распределения Вейбулла | Информативный параметр для экземпляров класса $K_1$ |                          |                          | Информативный параметр для экземпляров класса $K_2$ |                          |                          |
|---------------------------------|---|--------------------------|--------------------------|---|--------------------------|--------------------------|
|                                 | $x_1 \rightarrow U_{ЗИ.пор}$                        | $x_2 \rightarrow C_{ЗС}$ | $x_3 \rightarrow C_{ЗИ}$ | $x_1 \rightarrow U_{ЗИ.пор}$                        | $x_2 \rightarrow C_{ЗС}$ | $x_3 \rightarrow C_{ЗИ}$ |
| $a$                             | 0,45  | 25,32                    | 3,96                     | 0,60  | 37,11                    | 16,88                    |
| $b$                             | 2,48  | 2,54                     | 0,70                     | 2,88  | 2,95                     | 0,81                     |
| $c$                             | 2,61  | 750,8                    | 454,0                    | 2,15  | 762,1                    | 447                      |

Используя экспериментальные данные обучающих экспериментов на примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А и полевых транзисторов большой мощности типа КП744А были исследованы вероятностные свойства информативных параметров. Установлено, что для используемых информативных параметров этих ИЭТ подтверждается гипотеза о трёхпараметрическом распределении Вейбулла, согласно которому плотность распределения информативного параметра (обозначен через  $x$ ) имеет вид модели (2), в которой  $a > 0$  – параметр масштаба,  $b > 0$  – параметр формы,  $c$  – параметр сдвига,  $x > c$ :

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

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

Моделирование информативных параметров полевых транзисторов КП744А, отвечающих обучающей и контрольным выборкам, выполнялось по следующему вычислительному алгоритму (3):

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

Результаты обучающего эксперимента, смоделированного на компьютере, были использованы для получения моделей прогнозирования для случаев преобразование информативных параметров как в двоичные (1 и 0), так и троичные (1, 0, R) кодовые сигналы. Полученные модели прогнозирования были применены для прогнозирования к экземплярам обучающей выборки (5000 экземпляров) и к четырём контрольным выборкам, каждая объёмом по 5000 экземпляров. Причём действительный класс экземпляров контрольных выборок был известен до процедуры применения моделей прогнозирования [2]. На этапе индивидуального прогнозирования путём сравнения прогнозного класса экземпляра с действительным классом определена вероятность принятия правильных прогнозов  $P_{прав}$  в предположении применения для прогнозирования моделей, основанных на использовании прогнозирующих функций в случае преобразования информативных параметров в двоичные кодовые сигналы и при преобразовании информативных параметров в троичные кодовые сигналы [3]. В таблице 3 приведены значения вероятностей  $P_{прав}$ , полученные для обучающей выборки и усреднённые значения  $P_{прав}$  по результатам применения исследуемых моделей к четырём контрольным выборкам.

**Таблица 3** Эффективность моделей прогнозирования, полученная применением моделей прогнозирования к обучающей и контрольным выборкам

| Описание прогнозирующей функции $F^{(i)}$  | Значение порога разделения классов | Вероятность правильных прогнозов класса работоспособности |                     |
|--|------------------------------------|---|---------------------|
|  |                                    | обучающая выборка   | контрольная выборка |
| <b>Преобразование информативных параметров в двоичные кодовые сигналы</b>                    |                                    |   |                     |
| Базовый метод, использование близости к классу $K_1$   | 1,704                              | 0,8818  | 0,8803              |
| Разность показателей близости к классам $K_1$ и $K_2$  | 0                                  | 0,8818  | 0,8803              |
| Отношение показателей близости к классу $K_1$ и $K_2$  | 0                                  | 0,8818  | 0,8803              |
| Использование частной информации о классах $K_1$ и $K_2$                                     | 0 бит                              | 0,8818  | 0,8809              |
| <b>Преобразование информативных параметров в троичные кодовые сигналы</b>                    |                                    |   |                     |
| Аналог базового МПЛ с использованием кодов 1, 0, R   | 1,428                              | 0,9246  | 0,9151              |
| Разность показателей близости к классам $K_1$ и $K_2$  | 0                                  | 0,9162  | 0,9108              |
| Отношение показателей близости к классам $K_1$ и $K_2$                                       | 0                                  | 0,9162  | 0,9108              |
| Использование частной информации о классах $K_1$ и $K_2$                                     | 0 бит                              | 0,9246  | 0,9151              |
| <b>Метод статистических решений</b>  |                                    |   |                     |
| Гипотеза о нормальном распределении информативных параметров в классах $K_1$ и $K_2$         | 0                                  | 0,9132  | 0,9116              |
| Гипотеза о распределении информативных параметров в классах $K_1$ и $K_2$ по закону Вейбулла | 0                                  | 0,9136  | 0,9062              |

### Результаты и их обсуждение

Анализ результатов, полученных с использованием реального обучающего эксперимента и обучающего эксперимента, выполненного методом имитационного статистического моделирования на компьютере, позволил сделать следующие выводы:

1. В общем случае модели прогнозирования, основанные на преобразовании информативных параметров в троичные кодовые сигналы, обеспечивают лучшие результаты прогнозирования, нежели модели на основе преобразования информативных параметров в двоичные кодовые сигналы.

2. Модели прогнозирования, использующие частную информацию о классе  $K_1$  и классе  $K_2$ , содержащуюся в сообщениях о получении путём преобразования набора кодовых сигналов, в рамках своего вида преобразования информативных параметров (двоичное или троичное) обеспечивают меньшие ошибки прогнозирования класса работоспособности ИЭТ и при этом отпадает необходимость в определении порога разделения классов.

3. В случае преобразования информативных параметров в двоичные кодовые сигналы модель, использующая учёт энтропии классов  $K_1$  и  $K_2$ , не позволяет получить наименьшие ошибки прогнозирования из-за неучёта корреляции информативных параметров при

определении условной энтропии класса экземпляра с учётом полученного набора двоичных кодовых сигналов [4].

4. Модели прогнозирования, основанные на преобразовании информативных параметров в кодовые сигналы (двоичные или троичные) можно представить в виде простых логических таблиц, с помощью которых можно сразу сделать прогноз класса работоспособности для заданной наработки рассматриваемого (прогнозируемого) экземпляра.

5. Методом имитационного статистического моделирования на ПЭВМ обучающих экспериментах также установлено: предлагаемые модели прогнозирования, использующие преобразование информативных параметров в двоичные кодовые сигналы по эффективности (вероятности принятия правильных решений) незначительно уступают методу статистических решений. Также в случае преобразования информативных параметров в троичные кодовые сигналы модель, основанная на использовании частной информации о классе  $K_1$  и классе  $K_2$ , содержащейся в получаемом наборе троичных кодовых сигналов на примере исследуемых типов транзисторов обеспечила лучшие результаты прогнозирования, нежели метод статистических решений в предположении нормальных законов распределения информативных параметров отдельно в классах  $K_1$  и  $K_2$ .

### Заключение

Как следует из результатов, проведенных в таблице 3, модели прогнозирования, использующие суммарное значение частной информации о классе  $K_1$  и классе  $K_2$ , получаемой от набора двоичных (1 или 0) и троичных (1, 0 или R), в рамках своего вида преобразования информативных параметров обеспечивают большее значение вероятности принятия решений, то есть меньшие ошибки прогнозирования класса работоспособности полупроводниковых приборов, нежели другие модели. С использованием результатов индивидуального прогнозирования, полученным при рассмотрении обучающей и контрольных выборок установлено, что модель прогнозирования, использующая суммарное значение частной информации о классе  $K_1$  и классе  $K_2$ , в случае троичного преобразования на 10...20% меньше, нежели аналогичная модель в случае преобразования информативных параметров. Поэтому эта модель рекомендуется для использования при решении практических задач индивидуального прогнозирования класса работоспособности полупроводниковых приборов.

### Список литературы

1. Боровиков С.М., Казючиц В.О., Шнейдеров Е.Н. Выбор информативных параметров для прогнозирования индивидуальной надежности полупроводниковых приборов. Технические средства защиты информации : тезисы докладов XIX Белорусско-российской научно -технической конференции, Минск, 8 июня 2021 г.
2. Шнейдеров Е. Н., Бурак И. А., Боровиков С. М., Гришель, Р. П. Получение практических навыков по методам прогнозирования надёжности изделий электронной техники: Высшее техническое образование: проблемы и пути развития: материалы VII Международной научно-методической конференции.
3. Боровиков С. М., Шнейдеров Е. Н., Журов П. А., Бруй А. А. Модели прогнозирования эксплуатационной безотказности электрических и электромеханических компонентов электронных устройств: Технические средства защиты информации : тезисы докладов XVIII Белорусско-российской научно-технической конференции, Браслав.
4. Боровиков С. М., Бересневич А. И., Шалак А. В., Шнейдеров Е. Н. Оценка ошибок прогнозирования параметрической надёжности изделий электронной техники: Технические средства защиты информации : тезисы докладов XVIII Белорусско-российской научно-технической конференции, Браслав.