

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
Преобразование информативных параметров в двоичные кодовые сигналы			
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
Преобразование информативных параметров в троичные кодовые сигналы			
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
Метод статистических решений			
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.