

ПОИСК ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАК ОДНА ИЗ ЗАДАЧ ПРОЦЕДУРЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Казючиц Владислав Олегович

магистр техн. наук, аспирант,

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

Боровиков Сергей Максимович

канд. техн. наук, доц.,

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

Шнейдеров Евгений Николаевич

канд. техн. наук, доц.,

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

SEARCH FOR INFORMATIVE PARAMETERS AS ONE OF THE TASKS OF THE PROCEDURE OF INDIVIDUAL PREDICTIONS OF THE RELIABILITY OF SEMICONDUCTOR DEVICES

Vladislav Kaziuchyts

Postgraduate student, Master of Engineering Science,

*Belarusian State University of informatics and radioelectronics,
Republic of Belarus, Minsk*

Sergei Borovikov

Candidate of Sciences, Associate Professor,

*Belarusian State University of informatics and radioelectronics,
Republic of Belarus, Minsk*

Evgeni Shneiderov

Candidate of Sciences, Associate Professor,

*Belarusian State University of informatics and radioelectronics,
Republic of Belarus, Minsk*

АННОТАЦИЯ

Экземпляры полупроводниковых приборов повышенного уровня безотказности для работы в составе ответственной аппаратуры (военная и ракетно-космическая техника, электронная аппаратура обеспечения безопасности объектов и производственных процессов и т.д.) могут быть отобраны методом индивидуального прогнозирования надёжности приборов по их информативным параметрам. Выбор параметров, используемых в качестве информативных, является одной из важнейших задач процедуры прогнозирования надёжности. Применительно к конкретному типу полупроводниковых приборов информативные параметры, как правило, не известны и задача их поиска решается экспериментально. Успешному решению этой задачи будет способствовать чёткое понимание сути основных этапов процедуры индивидуального прогнозирования надёжности по информативным параметрам. В статье рассматривается общий подход к выполнению индивидуального прогнозирования надёжности полупроводниковых приборов по значениям их информативных параметров. На примере полевых транзисторов большой мощности типа КП744А поясняется экспериментальное определение информативных параметров. Размер исследуемой выборки транзисторов (200 экземпляров), значительное число измеренных электрических параметров (около 50) и разные электрические режимы измерения каждого из них обусловили большой объём экспериментальных данных, подлежащих обработке. Выполненный корреляционный анализ электрических параметров, исследуемых на информативность, позволил сократить их число и тем самым уменьшить объём контрольных операций для транзисторов при проведении в дальнейшем их ускоренных испытаний на надёжность.

ABSTRACT

Instances of semiconductor devices with an increased level of reliability for operation as part of critical equipment (military and rocket and space technology, electronic equipment for ensuring the safety of facilities and production processes,

etc.) can be selected by the method of individually predicting the reliability of devices according to their informative parameters. The choice of parameters used as informative is one of the most important tasks of the reliability prediction procedure. As a rule, informative parameters are not known for a specific type of semiconductor devices, and the problem of their search is solved experimentally. The successful solution of this problem will be facilitated by a clear understanding of the essence of the main stages of the procedure for individual forecasting of reliability by informative parameters. The article discusses a general approach to the implementation of individual prediction of the reliability of semiconductor devices by the values of their informative parameters. Using the example of high-power field-effect transistors of the КП744А type, the experimental determination of informative parameters is explained. The size of the studied sample of transistors (200 copies), a significant number of measured electrical parameters (about 50) and different electrical measurement modes for each of them resulted in a large amount of experimental data to be processed. The performed correlation analysis of electrical parameters studied for informational content made it possible to reduce their number and thereby reduce a volume of the measure operations for transistors during their further accelerated tests for reliability.

Ключевые слова: надёжность, транзисторы большой мощности, индивидуальное прогнозирование, информативные параметры, корреляционный анализ, ускоренные испытания.

Keywords: reliability, high-power transistors, individual forecasting, informative parameters, correlation analysis, accelerated testing.

Введение. Статья подготовлена по результатам выполнения проекта № Т20МВ-026 на тему «Прогнозирование эксплуатационной надёжности мощных полупроводниковых приборов с использованием методов и алгоритмов машинного обучения». Проект утверждён Научным советом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований 22 апреля 2020 года по результатам конкурса «БРФФИ–Минобразование М-2020».

Известно [1-3], что безотказная работа элементов при их работе в составе электронных устройств во многом определяет надёжность электронной аппаратуры. Эффективным способом обеспечения надёжности электронных устройств является постановка в них элементов повышенного уровня надёжности. Получить такие элементы можно путём их отбора из партии элементов, прошедших выходной контроль в условиях промышленных предприятий. Отбор экземпляров повышенного уровня надёжности может быть выполнен с помощью индивидуального прогнозирования по информативным параметрам [1, с. 68; 3, с. 218]. Термин «индивидуальное прогнозирование» означает, что у конкретного экземпляра (элемента) выполняется измерение информативных параметров и с учётом полученных их значений принимается решение об уровне надёжности этого же экземпляра. Информативные параметры контролируются (измеряются) в начальный момент времени до постановки элемента в электронное устройство. Прогнозируют уровень надёжности элемента для заданной наработки (будущего момента времени).

Индивидуальное прогнозирование надёжности вызывает особый интерес у специалистов применительно к мощным полупроводниковым приборам (ППП). Мощные ППП входят в состав электронной аппаратуры разного функционального назначения. Значительное влияние на надёжность мощных ППП оказывает тепловая нагрузка на полупроводниковый кристалл. Приборы, прошедшие выходной контроль на промышленном предприятии и признанные годными к эксплуатации, заметно отличаются значениями переходного теплового сопротивления кристалл-корпус. Поэтому разные экземпляры ППП одного и того же типа характеризуются неодинаковыми возможностями по отводу тепловой энергии от

кристалла, что сказывается на безотказности приборов при их работе в составе электронных устройств. Процедура индивидуального прогнозирования надёжности для мощных ППП является актуальной, поскольку тепловая нагрузка на кристалл повышает вероятность преждевременного отказа приборов в составе аппаратуры.

Характеристика индивидуального прогнозирования. Для решения задачи индивидуального прогнозирования надёжности ППП данного типа надо знать их информативные параметры. Под информативным понимают такой электрический параметр ППП, значение которого в момент времени $t = 0$ несёт информацию о надёжности ППП в будущем, то есть при $t = t_{пр}$, где $t_{пр}$ – заданное время прогнозирования [1, с. 68].

Для ППП использование лишь одного информативного параметра может приводить к заметным ошибкам прогнозирования, поэтому на практике с целью повышения достоверности прогнозов используют совокупность информативных параметров (обычно 3...6 параметров).

Совокупность информативных параметров x_1, x_2, \dots, x_k , измеренная у конкретного экземпляра (будем называть его j -м экземпляром) в момент времени $t = 0$, образует как бы образ этого экземпляра. Задача индивидуального прогнозирования состоит в том, чтобы правильно распознать этот образ, то есть правильно указать уровень надёжности данного экземпляра для будущего момента времени $t = t_{пр}$. Отсюда понятно и другое название этого прогнозирования – индивидуальное прогнозирование распознаванием образа (используется в технических источниках и среди специалистов).

При этом виде прогнозирования решение о надёжности ППП рассматриваемого типа принимают путём отнесения j -го экземпляра к одному из классов с точки зрения уровня его надёжности на будущий момент времени $t = t_{пр}$. В практических приложениях обычно находят применение разновидности индивидуального прогнозирования, при которых конкретный экземпляр относят к одному из двух классов с точки зрения надёжности на заданный будущий момент времени $t_{пр}$ [1-6 и др.]:

K_1 – класс надёжных экземпляров;

K_2 – класс потенциально ненадёжных экземпляров.

Следует иметь в виду, что класс экземпляров соответствует будущему моменту времени $t_{пр}$, который интересует исследователя.

Для принятия решения о классе экземпляра на момент времени $t_{пр}$ надо располагать прогнозирующим правилом. Оно должно показывать, как по информативным параметрам j -го экземпляра, измеренным в момент времени $t = 0$, принимать решение о классе, к которому этот экземпляр будет принадлежать на будущий момент времени $t = t_{пр}$. Прогнозируемое правило получают в виде [3, с. 219]

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

где: $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ – значения информативных параметров j -го экземпляра в начальный момент времени ($t = 0$);

$F(x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)})$ – значение решающей функции, подсчитанное для j -го экземпляра;

k – количество информативных параметров, используемых для решения задачи индивидуального прогнозирования;

P_0 – порог (иначе – критерий) разделения классов, определяемый экспериментально, исходя из условия лучшего разделения классов.

Прогнозируемое правило записано в предположении, что лучшему уровню надёжности ППП, то есть экземплярам класса K_1 , в среднем будут соответствовать большие значения решающей функции F , а экземплярам класса K_2 – меньшие значения этой функции.

Если информативные параметры рассматриваемого типа ППП получены, то для решения задачи индивидуального прогнозирования применительно к этому типу ППП необходимо выполнить ряд действий, последовательность которых иллюстрируется схемой, показанной на рисунке 1.

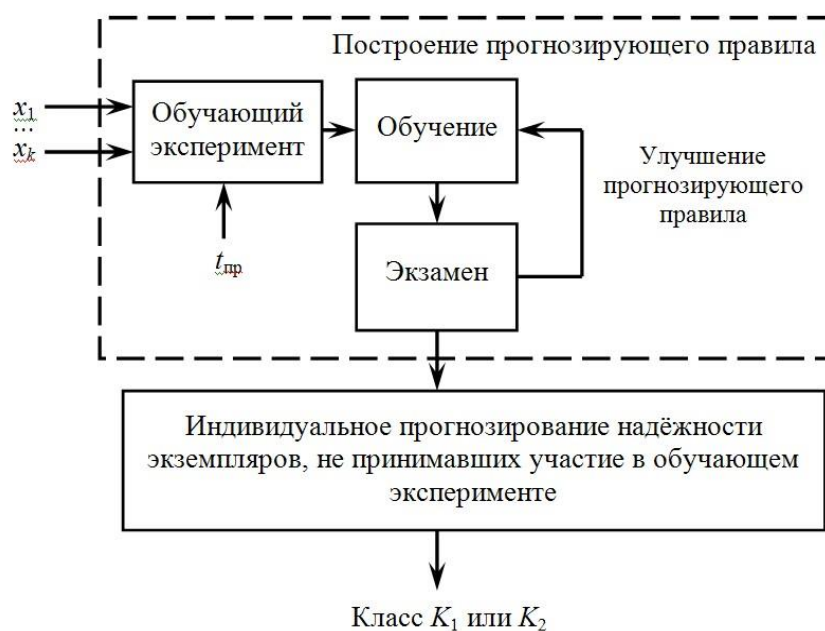


Рисунок 1. Этапы решения задачи индивидуального прогнозирования надёжности ППП по информативным параметрам

На рисунке 1 информативные параметры обозначены как x_1, \dots, x_k . Выполняя на практике первые три этапа, получают прогнозирующее правило вида (1). Последний (четвёртый) этап – это применение построенного правила для индивидуального прогнозирования надёжности новых экземпляров, то есть это то, ради чего выполнялись предварительные исследования – первые три этапа. Под «новыми» здесь понимаются однотипные экземпляры, которые не принимали участия в предварительных исследованиях.

Обучающий эксперимент и обучение. Обучающий эксперимент представляет собой испытание на надёжность (безотказность, длительную наработку) определённой выборки интересующего типа ППП в течение времени $t = t_{пр}$, желательно в том электрическом режиме и условиях работы, которые будут иметь место при реальной эксплуатации ППП в составе электронного устройства. Указанную выборку называют обучающей, её объём составляет примерно 60...200 экземпляров. Результаты обучающего эксперимента в виде испытаний на надёжность экземпляров обучающей выборки удобно представить в виде таблицы 1 [1, с. 71].

Таблица 1.

Результаты обучающего эксперимента

Номер экземпляра обучающей выборки	Значения информативного параметра при $t = 0$			Класс экземпляра для момента времени $t = t_{пр}$
	x_1	...	x_k	
1	$x_1^{(1)}$...	$x_k^{(1)}$	$K_s^{(1)}$
...
n	$x_1^{(n)}$...	$x_k^{(n)}$	$K_s^{(n)}$

Перед проведением испытаний экземпляры обучающей выборки необходимо пометить. После этого следует выполнить измерение информативных параметров x_1, \dots, x_k каждого экземпляра, и лишь тогда приступить к испытаниям обучающей выборки на надёжность. По истечении времени $t = t_{пр}$ необходимо выяснить класс каждого экземпляра K_s ($s = 1$ или $s = 2$). Если к моменту времени $t_{пр}$ экземпляр работоспособен, то его относят к классу K_1 , если неработоспособен – к классу K_2 . Таблица 1 в неявном виде показывает взаимосвязь между номером класса экземпляра (1 или 2) на момент времени работы $t_{пр}$ и значениями информативных параметров экземпляра в начальный момент времени ($t = 0$).

Время $t_{пр}$ может быть достаточно большим (тысячи и даже десятки тысяч часов). Поэтому с целью сокращения времени испытаний используют ускоренные, обычно форсированные испытания в течение времени $t_y \ll t_{пр}$, которое с точки зрения функционирования эквивалентно времени работы $t_{пр}$ в обычных условиях.

Обучение. Результаты обучающего эксперимента используются на этапе обучения. Цель этого этапа – выбрать метод построения прогнозирующего правила и для каждого экземпляра обучающей выборки подсчитать значение решающей функции F . Результаты этапа обучения в виде значений решающей функции, подсчитанных для каждого экземпляра обучающей выборки, используют на этапе экзамена (см. рисунок 1).

Выбор порога разделения классов (экзамен). Основная цель этого этапа состоит в определении порога разделения классов P_0 , исходя из условия обеспечения наилучших результатов прогнозирования. Кроме того, на этом этапе определяют значения возможных ошибок прогнозирования или оценивают вероятность принятия правильных решений в предположении применения построенного прогнозирующего правила к экземплярам обучающей выборки (как бы экзаменуемому полученное прогнозирующее правило), откуда становится понятным название этапа «экзамен».

С практическими критериями выбора порога P_0 и оценкой вероятностных характеристик результатов индивидуального прогнозирования, получаемых с помощью построенного прогнозирующего правила, можно ознакомиться в работах [1, 3, 6].

Выбор информативных параметров. Поиск информативных параметров выполняют обычно с

помощью экспериментальных исследований. Первым этапом таких исследований является измерение в начальный момент времени у каждого экземпляра обучающей выборки ППП интересующего типа таких электрических параметров, которые предположительно могут оказаться информативными. Решение об информативности параметров принимают по результатам испытаний этой выборки ППП на надёжность (безотказность) при длительной нагрузке. Обычно проводят форсированные испытания, позволяющие за относительно короткое время получить о полупроводниковых приборах ту же информацию о надёжности, что и при длительной нагрузке в обычных нормальных условиях.

Постановка задачи и ее решение. Ставилась задача по поиску информативных параметров применительно к полевым транзисторам большой мощности типа КП744А [7]. Объём обучающей выборки составлял 200 экземпляров. Был выполнен первый этап исследований, предусматривающий измерение электрических параметров, которые гипотетически могут быть информативными для транзисторов исследуемого типа. В число измеряемых электрических параметров были включены не только электрические параметры, нормируемые в технической документации, но и специфические параметры, которые даже не упоминаются в технических условиях или справочниках, например, добротность ёмкости перехода затвор-сток. При выполнении измерений были приняты во внимание предельно допустимые значения электрических параметров исследуемых полевых транзисторов [7].

Измерение большинства электрических параметров исследуемых транзисторов выполнялось на сертифицированных измерительных установках «ИНЕЙ» и «ГАММА» в испытательном центре ОАО «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск). Специфические электрические параметры измерялись в лабораториях университета с использованием стандартных контрольно-измерительных приборов. Всего для дальнейшей обработки было измерено 45 электрических параметров.

Корреляционная матрица параметров. Результаты измерений электрических параметров были обработаны с помощью инструмента «Корреляция» пакета «Анализ данных» приложения Microsoft Excel. Этот инструмент анализа позволяет получить коэффициенты линейной корреляции между всеми возможными парами параметров. Итоги обработки

отображаются в виде корреляционной матрицы параметров, которая является симметричной относительно своей единичной диагонали, поэтому приводится только её нижняя часть. Таблица 2 является иллюстрацией (частью) полученной корреляционной матрицы. В таблицу включено девять параметров, прежде всего те, которые наиболее заметно

коррелированы с тепловым сопротивлением кристалл-корпус $R_{t \text{ кр-корп}}$ – параметром, являющимся информативным для полупроводниковых приборов большой мощности, но измерение которого усложняет процедуру прогнозирования и увеличивает её длительность при получении прогноза надёжности приборов.

Таблица 2.

Корреляционная матрица параметров

Параметр	$U_{обр}$	$R_{обр}$	$U_{зи. пор}$	$U_{пр}$	$R_{си. отк}$	$R_{t \text{ кр-корп}}$	$C_{зс}$	$Q_{C.зс}$	$C_{зи}$
$U_{обр}$	1								
$R_{обр}$	0,261	1							
$U_{зи. пор}$	0,801	-0,129	1						
$U_{пр}$	0,215	0,957	-0,173	1					
$R_{си. отк}$	0,316	0,942	-0,043	0,868	1				
$R_{t \text{ кр-корп}}$	0,568	-0,334	0,684	-0,320	-0,315	1			
$C_{зс}$	-0,739	-0,011	-0,787	0,093	-0,166	-0,468	1		
$Q_{C.зс}$	0,692	-0,129	0,830	-0,201	-0,008	0,553	-0,888	1	
$C_{зи}$	-0,429	0,162	-0,581	0,213	0,089	-0,431	0,590	-0,563	1

Пояснения параметров, включённых в таблицу 2, приводятся в таблице 3.

Анализ корреляционной матрицы (см. таблицу 2) позволил уменьшить количество параметров, измеряемых на этапе проведения ускоренных испытаний транзисторов на надёжность (длительную наработку).

Кроме того, установлено, что тепловое сопротивление кристалл-корпус $R_{t \text{ кр-корп}}$ заметно коррелировано со следующими параметрами: обратное напряжение затвор-исток $U_{обр}$, пороговое напряжение затвор-исток $U_{зи. пор}$, ёмкость затвор-сток $C_{зс}$, добротность ёмкости затвор-сток $Q_{C.зс}$ и ёмкость затвор-исток $C_{зи}$.

Таблица 3.

Пояснение параметров корреляционной матрицы

Обозначение параметра	Пояснение	Размерность	*Режим измерения
$U_{обр}$	Обратное напряжение перехода затвор-исток	В	$I_c = -0,1 \text{ А}$
$R_{обр}$	Обратное сопротивление перехода сток-исток	МОм	$I_c = 0,1 \text{ А}$
$U_{зи. пор}$	Пороговое напряжение	В	$I_c = 250 \text{ мкА}$
$U_{пр}$	Прямое напряжение перехода сток-исток	В	$I_c = -9,2 \text{ А}$ $U_{зи} = 0$
$R_{си. отк}$	Сопротивление перехода сток-исток в открытом состоянии	Ом	$I_c = 5,5 \text{ А}$ $U_{зи} = 10 \text{ В}$
$R_{t \text{ кр-корп}}$	Тепловое сопротивление переход-корпус транзистора	°С/Вт	–
$C_{зс}$	Ёмкость перехода затвор-сток	пФ	$U_{зс} = 0$
$Q_{C.зс}$	Добротность ёмкости перехода затвор-сток	–	$U_{зс} = 0$
$C_{зи}$	Ёмкость перехода затвор-исток	пФ	$U_{зи} = 0$

*Примечания: I_c – ток стока, $U_{зи}$ – напряжение затвор-исток, $U_{зс}$ – напряжение затвор-сток

Принимая во внимание коэффициенты парной корреляции для указанных пяти параметров, можно рекомендовать параметры $U_{зи. пор}$ и $C_{зи}$ к использованию вместо параметра $R_{t \text{ кр-корп}}$, являющегося для ППП информативным, но усложняющим процедуру прогнозирования.

Заключение. Рассмотренные этапы индивидуального прогнозирования надёжности ППП по информативным параметрам позволяют осмыслить суть процедуры прогнозирования и значение в ней самих информативных параметров. Это будет способствовать более эффективному их определению

с помощью экспериментальных исследований ППП. На примере полевых транзисторов большой мощности типа КП744А поясняются начальные этапы этих исследований (измерение и предварительная обработка), позволившие с помощью корреляционного анализа электрических параметров, исследуемых

на информативность, уменьшить число параметров, подлежащих измерению при проведении ускоренных испытаний транзисторов на надёжность. Окончательное решение об информативности параметров может быть принято путём обработки результатов ускоренных испытаний [1, с. 171-175].

Список литературы:

1. Боровиков С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники : монография / С.М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.
2. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники / С.М. Боровиков [и др.]; под ред. С.М. Боровикова; УО «БГУИР». – Минск : МГВРК, 2010. – 308 с.
3. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студентов инж.-техн. спец. вузов / С.М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
4. Гаскаров Д.В. Прогнозирование технического состояния и надёжности радиоэлектронной аппаратуры / Д.В. Гаскаров, Т.А. Голинкевич, А.В. Мозгалевский ; под ред. Т.А. Голинкевича. – М. : Сов. радио, 1974. – 224 с.
5. Чернышев А.А. Основы надёжности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.А. Чернышев. – М. : Радио и связь, 1988. – 256 с.
6. Пестряков В.Б. Индивидуальное прогнозирование состояния РЭА с использованием теории распознавания образов : учеб. пособие / В.Б. Пестряков, В.В. Андреева. – Куйбышев : Изд-во КуАИ, 1980. – 89 с.
7. КП744. Мощный вертикальный n -канальный МОП-транзистор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.transistor.by/i/pdf/kp744.pdf> – Дата доступа: 14.04.2021.