

УДК 621.382.33–027.45

АНАЛИТИКА И КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ



В.О. Казюциц
Аспирант БГУИР, магистр
технических наук



Е.Н. Шнейдеров
Начальник центра
развития дистанционного
образования, кандидат
технических наук, доцент



С.М. Боровиков
Доцент кафедры ПИКБ БГУИР,
кандидат
технических наук, доцент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Республика Беларусь.

E-mail: vladkaz@bsuir.by, shneiderov@bsuir.by, bsm@bsuir.by.

В. О. Казюциц

Окончил БГУИР (2017 г.), в настоящее время является аспирантом этого университета, магистр технических наук. Проводит научные исследования по прогнозированию надёжности полупроводниковых приборов большой мощности.

Е. Н. Шнейдеров

Начальник Центра развития дистанционного образования (ЦРДО) БГУИР. Основная область научных интересов – оценка надёжности изделий электронной техники методами прогнозирования.

С. М. Боровиков

Доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем БГУИР. Основная область научных интересов: прикладные математические методы в проектировании изделий радиоэлектроники, включая алгоритмы статистического прогнозирования надёжности изделий электронной техники и оценку надёжности прикладного программного обеспечения на ранних этапах его разработки.

Аннотация. Для индивидуального прогнозирования надёжности мощных полупроводниковых приборов необходимо знать информативные параметры, их поиск выполняют с помощью экспериментальных исследований. Для транзисторов большой мощности типа КП744А были измерены электрические параметры, которые предположительно могут оказаться информативными. Значительный размер исследуемой выборки транзисторов, большое число электрических параметров и разные электрические режимы измерения каждого из параметров обусловили очень большой объём данных, подлежащих обработке. Выполненная аналитика и корреляционный анализ параметров позволили сократить их число и тем самым упростить дальнейшие экспериментальные исследования транзисторов при проведении ускоренных испытаний на надёжность, а также определить параметры, которые просты в измерении и заметно коррелированы с тепловым сопротивлением кристалл-корпус – параметром, являющимся информативным для полупроводниковых приборов большой мощности, но неудобным для измерения при проведении процедуры прогнозирования надёжности приборов в условиях производственных помещений.

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

Материалы доклада подготовлены по результатам выполнения проекта № Т20МВ-026 на тему «Прогнозирование эксплуатационной надёжности мощных полупроводниковых приборов с использованием методов и алгоритмов машинного обучения», утверждённого Научным советом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований 22 апреля 2020 года по результатам конкурса «БРФФИ–Минобразование М-2020». Проект выполняется в 2020-2022 годах кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем в лаборатории научно-

исследовательской группы 5.1 «Методы проектирования, испытания и программирования надёжности электронных систем» научно-исследовательской части (НИЧ) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Введение.

Одним из способов повышения надёжности электронной аппаратуры является постановка в неё элементов повышенного уровня надёжности. Эта процедура для мощных полупроводниковых приборов является актуальной, поскольку тепловая нагрузка на кристалл повышает вероятность преждевременного отказа приборов в составе аппаратуры. Известно [1], что отбор экземпляров повышенного уровня надёжности может быть выполнен с помощью индивидуального прогнозирования по информативным параметрам. Причём информативные параметры контролируются (измеряются) у конкретного экземпляра в начальный момент времени (до постановки полупроводникового прибора в электронное устройство) и по их значениям прогнозируют безотказную работу этого экземпляра в течение заданной наработки. Для решения задачи индивидуального прогнозирования надёжности полупроводниковых приборов данного типа надо знать их информативные параметры.

Поиск информативных параметров выполняют обычно с помощью экспериментальных исследований. Первым этапом таких исследований является измерение в начальный момент времени у каждого экземпляра определённой выборки полупроводниковых приборов интересующего типа таких электрических параметров, которые гипотетически могут оказаться информативными. Указанную выборку называют обучающей, её объём составляет примерно 60...200 экземпляров. А окончательное решение об информативности параметров принимают по результатам испытаний этой выборки полупроводниковых приборов на надёжность при длительной наработке. Обычно проводят ускоренные, как правило, форсированные испытания, позволяющие за относительно короткое время получить о полупроводниковых приборах ту же информацию о надёжности, что и при длительной наработке в обычных нормальных условиях.

Постановка задачи и ее решение.

Ставилась задача по поиску информативных параметров применительно к полевым транзисторам большой мощности типа КП744А. Объём обучающей выборки составлял 200 экземпляров. Был выполнен первый этап исследований, предусматривающий измерение электрических параметров, которые предположительно могут быть информативными для транзисторов исследуемого типа. В число измеряемых электрических параметров были включены не только электрические параметры, нормируемые в технических условиях, но и специфические параметры, которые даже не упоминаются в технической документации или справочниках, например, добротность ёмкости перехода затвор-сток. При выполнении измерений были приняты во внимание предельно допустимые значения параметров исследуемых полевых транзисторов (таблица 1).

Измерение большинства электрических параметров исследуемых транзисторов выполнялось на сертифицированных измерительных установках «ИНЕЙ» и «ГАММА» в испытательном центре ОАО «ИНТЕГРАЛ». Специфические электрические параметры измерялись в лабораториях кафедры с использованием стандартных контрольно-измерительных приборов. Всего для дальнейшей обработки было измерено 50 электрических параметров, объём выборки составлял 200 экземпляров (табл. 1.).

Таблица 1. Предельно допустимые параметры транзисторов типа КП744А [2]

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Предельное значение
Напряжение сток-исток	$U_{си \max}$	В	100
Напряжение затвор-исток	$U_{зи \max}$	В	-20...+20
Постоянный ток стока	$I_{с \max}$	А	9,2
Импульсный ток стока.	$I_{с. и \max}$	А	37
Рассеиваемая мощность	P_{\max}	Вт	60
Прямой ток диода	$I_{пр. \max}$	А	9,2
Температура перехода	$T_{пер}$	°С	175

Результаты.

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 фрагментом (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). В таблице 3 приводятся пояснения параметров, включённых в таблицу 2.

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

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	$I_c = -9,2 \text{ А}$
$R_{си. отк}$	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

Анализируя корреляционную матрицу (см. таблицу 2), можно убедиться, 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 $C_{зи}$. Принимая во внимание коэффициенты парной корреляции для указанных четырёх параметров, можно рекомендовать параметры $U_{обр}$ и $C_{зи}$ к использованию вместо параметра $R_{t \text{ кр-корп}}$.

Заключение.

Для поиска информативных параметров, необходимых для прогнозирования надёжности полевых транзисторов большой мощности типа КП744А, были измерены значения 50-ти электрических параметров, которые предположительно могут оказаться информативными. Выполненные аналитика и корреляционный анализ позволили уменьшить число электрических

параметров, исследуемых при проведении ускоренных испытаний транзисторов на надёжность. На основе рассмотрения корреляции электрических параметров предложено вместо параметра $R_{кр-корп}$ (тепловое сопротивление кристалл-корпус), являющегося для полупроводниковых приборов информативным, но усложняющим процедуру прогнозирования, использовать два других, легко измеряемых параметра.

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] КП744. Мощный вертикальный n-канальный МОП-транзистор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.transistor.by/i/pdf/kp744.pdf> – Дата доступа: 14.02.2021.

ANALYTICS AND CORRELATION ANALYSIS IN DETERMINING INFORMATIVE PARAMETERS OF POWERFUL SEMICONDUCTOR DEVICES

V.O. KAZIUCHYTS,
Postgraduate student BSUIR,
Master of engineering

E.N. SHNEIDEROV, PhD
Head of the Center for the
Development of Distance Education,
Associate Professor

S.M. BOROVIKOV, PhD
Associate Professor, Department
of Information and Computer
Systems Design BSUIR

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
E-mail: vladkaz@bsuir.by, shneiderov@bsuir.by, bsm@bsuir.by

Abstract. For individual prediction of the reliability of powerful semiconductor devices, it is necessary to know the informative parameters; their search is carried out using experimental studies. For high-power transistors of the KP744A type, electrical parameters were measured, which presumably may turn out to be informative. The significant size of the investigated sample of transistors, a large number of electrical parameters, and different electrical measurement modes for each of the parameters resulted in a very large amount of data to be processed. The performed analytics and correlation analysis of the parameters made it possible to reduce their number and thereby simplify further experimental studies of transistors during accelerated reliability tests. This also made it possible to determine parameters that are easy to measure and are significantly correlated with the thermal resistance of the crystal-package - a parameter that is informative for semiconductor devices of high power, but inconvenient for measuring when carrying out the procedure for predicting the reliability of devices in industrial premises.

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