

УДК 621.382 + 681.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛ-КОРПУС МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПО КОСВЕННЫМ ПРИЗНАКАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ

Казючиц В.О.

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

Научный руководитель: Боровиков С.М. – канд.техн.наук, доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. На примере полевых транзисторов большой мощности типа КП744А показана возможность оценки теплового сопротивления кристалл–корпус, используя косвенные электрические параметры, подставляемые в модель прогнозирования в виде уравнения регрессии.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, надёжность, индивидуальное прогнозирование, информативные параметры, тепловое сопротивление кристалл–корпус, уравнение регрессии

Введение. Индивидуальное прогнозирование надёжности изделий электронной техники по значениям их информативных параметров, полученным в начальный момент времени, позволяет для конкретного экземпляра указать класс, к которому он будет принадлежать для интересующей заданной наработки: K_1 – класс работоспособных, K_0 – класс неработоспособных экземпляров. Такое прогнозирование представляет определённый интерес для предприятий, выполняющих сборку электронной аппаратуры, так как позволяет из выборки однотипных приборов сделать отбор экземпляров, отвечающих требованию по надёжности (экземпляры класса K_1). Для отбора экземпляров класса K_1 необходимо иметь прогнозирующее правило, показывающее, как по значениям информативных параметров, измеренным в начальный момент времени, принимать решение о классе экземпляров [1–6]. Такое правило для изделий электронной техники интересующего типа получают один раз с помощью обучающего эксперимента (предварительных исследований определённой выборки изделий), а отбор экземпляров, отвечающих требованию надёжности (экземпляры класса K_1), производят из выборки, экземпляры которой не принимали участия в обучающем эксперименте.

Достоверность прогнозирования во многом зависит от удачности выбора информативных параметров для рассматриваемого типа изделий. Выбор информативных параметров является одним из важнейших этапов процедуры индивидуального прогнозирования класса надёжности изделий электронной техники [1, 2, 7].

Актуальность исследований. Известно [8], что для полупроводниковых приборов большой мощности достаточно информативным параметром является тепловое сопротивление кристалл–корпус. Ввиду инерционности тепловых процессов, протекающих в конструкции полупроводникового прибора, контроль этого параметра в условиях промышленных предприятий вызывает определённые проблемы прежде всего из-за длительности процедуры измерения. В то же время поиск для полупроводниковых приборов других параметров, обладающих достаточной информативностью, представляет непростую задачу [1, 2]. Актуальным является определение теплового сопротивления кристалл–корпус мощных полупроводниковых приборов с помощью контроля других, легко измеряемых электрических параметров, описывающих свойства приборов. Использование легко измеряемых электрических параметров будет способствовать уменьшению времени и трудозатрат при определении теплового сопротивления кристалл–корпус, используемого для полупроводниковых приборов большой мощности в качестве информативного параметра.

Методика проведения исследований. В качестве полупроводниковых приборов, на

примере которых разработан подход к оценке значения теплового сопротивления кристалл-корпус, рассматривались полевые транзисторы большой мощности типа КП744А. Для транзисторов этого типа была взята выборка объёмом 200 экземпляров и для неё проведён измерительный эксперимент.

Суть эксперимента заключалась в измерении у каждого экземпляра выборки десяти легко контролируемых электрических параметров (параметров, гипотетически рассматриваемых в качестве признаков), а затем в определении теплового сопротивления кристалл-корпус $R_{кр-корп}$ для каждого экземпляра с помощью специализированного измерительного оборудования.

В таблице 1 приводится пояснение некоторых параметров, которые в дальнейшем использовались в качестве признаков для прогнозирования значения теплового сопротивления кристалл – корпус $R_{кр-корп}$ полевых транзисторов типа КП744А.

Таблица 1 – Исследуемые электрические параметры транзисторов КП744А

Обозначение параметра	Пояснение	Размерность	*Режим измерения
$U_{обр-зи}$	Обратное напряжение перехода затвор-исток	В	$I_c = -0,1 \text{ A}$
$U_{зи, пор}$	Пороговое напряжение	В	$I_c = 250 \text{ мкА}$
$R_{си, отк}$	Сопротивление перехода сток-исток в открытом состоянии	Ом	$I_c = 5,5 \text{ A}$, $U_{зи} = 10 \text{ В}$
$C_{зс}$	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	$U_{зи} = 0$
$R_{кр-корп}$	Тепловое сопротивление кристалл-корпус транзистора	$^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	–

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

После завершения измерений вся выборка объёмом 200 экземпляров была случайным образом разделена на две выборки. Первая выборка объёмом 100 экземпляров рассматривалась в качестве обучающей выборки, а измерительный эксперимент для неё – в качестве обучающего эксперимента. Вторая выборка объёмом 100 экземпляров рассматривалась в качестве контрольной выборки. Обучающая выборка использовалась для получения модели прогнозирования теплового сопротивления $R_{кр-корп}$ транзисторов по значениям их электрических параметров, выбираемых в качестве признаков, а также для оценки возможных ошибок прогнозирования $R_{кр-корп}$ по полученной модели. Контрольная выборка использовалась для подтверждения качества полученной модели при определении (прогнозировании) значений $R_{кр-корп}$ транзисторов исследуемого типа.

Используя результаты измерения параметров транзисторов, с помощью инструмента анализа «Корреляция» приложения *Microsoft Excel* определялись коэффициенты парной линейной корреляции r между каждым параметром x_j ($j = 1, 2, \dots$), предполагаемым для использования в качестве признака, и тепловым сопротивлением $R_{кр-корп}$. После этого, рассматривая различные сочетания параметров, приведённых в табл. 1, выбиралось два параметра (признаки) x_1 и x_2 с заметной и/или умеренной корреляцией по шкале Чеддока ($|r| = 0,3 \dots 0,7$) с параметром $R_{кр-корп}$ и, используя результаты обучающего эксперимента, для прогнозирования теплового сопротивления $R_{кр-корп}$ получались модели в виде линейного уравнения регрессии

$$R_{кр-корп} = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2, \quad (1)$$

где x_1 и x_2 – выбранные признаки;

a_1 и a_2 – рассчитанные по прикладной программе для ЭВМ коэффициенты уравнения регрессии в предположении, что коэффициент a_0 (свободный член уравнения регрессии) равен нулю.

Затем по уравнению вида (1) находились прогнозные значения $R_{кр-корп}$ для экземпляров обучающей выборки и определялась возможная ошибка прогнозирования значений $R_{кр-корп}$. Использовалась средняя относительная ошибка прогнозирования $\Delta_{ср}$ [1, 2] (ошибка предсказания значений $R_{кр-корп}$), определяемая по формуле

$$\Delta_{ср} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(R_{кр-корп})_i^{прогн} - (R_{кр-корп})_i}{(R_{кр-корп})_i} \right| \cdot 100, \% \quad (2)$$

где n – объём обучающей выборки;

$(R_{кр-корп})_i^{прогн}$ – прогнозные значения параметра $R_{кр-корп}$ для i -го экземпляра обучающей выборки, полученное по уравнению вида (1);

$(R_{кр-корп})_i$ – экспериментальное (измеренное) значение параметра $R_{кр-корп}$ для i -го экземпляра обучающей выборки ($i = 1, 2, \dots, 100$).

Результаты и их обсуждение. Корреляционная матрица, полученная по результатам измерений рассматриваемых параметров транзисторов типа КП744А для экземпляров обучающей выборки, представлена в виде таблицы 2. В таблицу включено шесть параметров, которые наиболее коррелированы с тепловым сопротивлением кристалл-корпус $R_{кр-корп}$. Эти параметры в дальнейшем использовались в качестве признаков.

Таблица 2 – Корреляционная матрица параметров

Параметр	$U_{обр-зи}$	$U_{зи. пор}$	$R_{си. отк}$	$C_{зс}$	$Q(C_{зс})$	$C_{зи}$	$R_{кр-корп}$
$U_{обр-зи}$	1						
$U_{зи. пор}$	0,801	1					
$R_{си. отк}$	0,316	-0,043	1				
$C_{зс}$	-0,739	-0,787	-0,166	1			
$Q(C_{зс})$	0,692	0,830	-0,008	-0,888	1		
$C_{зи}$	-0,429	-0,581	0,089	0,590	-0,563	1	
$R_{кр-корп}$	0,568	0,684	-0,315	-0,468	0,553	0,431	1

Выбрав два признака ($U_{зи. пор}$ и $C_{зс}$), с помощью инструмента анализа «Регрессия» приложения *Microsoft Excel* для параметра $R_{кр-корп}$ получено линейное уравнение регрессии вида (1), для которого коэффициент детерминации $R^2 = 0,9996$:

$$R_{кр-корп} = 0,192 \cdot U_{зи. пор} + 0,00147 \cdot C_{зс}. \quad (3)$$

В таблице 3 в качестве иллюстрации приведён фрагмент данных об экспериментальных значениях $R_{кр-корп}$ для экземпляров обучающей выборки и значениях этого параметра, полученных по уравнению регрессии (3). Указаны рассчитанная средняя относительная ошибка прогнозирования $\Delta_{ср}$ и модуль максимальной относительной ошибки $|\Delta_i|_{max}$, зафиксированной для экземпляров обучающей выборки. Для каждого экземпляра выборки записана относительная ошибка прогнозирования Δ_i , определяемая модулем отношения, стоящего за знаком Σ в формуле (2).

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных и прогнозируемых значений $R_{кр-корп}$ (фрагмент)

Номер экземпляра обучающей выборки	Значение $R_{кр-корп}$, °C/Вт		Относительная ошибка прогнозирования $ \Delta_i $, %
	экспериментальное	по уравнению (3)	
1	1,66	1,684	1,46
2	1,60	1,663	3,95
3	1,70	1,684	0,92
4	1,66	1,685	1,51
5	1,70	1,688	0,72
...
Максимальная ошибка прогнозирования $ \Delta_i _{max}$, %			5,85
Средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{ср}$, %			1,71

Заключение. Использование двух электрических параметров, имеющих с тепловым сопротивлением кристалл–корпус заметную и/или умеренную корреляцию, позволяет по уравнению регрессии получать прогнозные оценки теплового сопротивления с относительной ошибкой, не превышающей 5...7 процентов. Модель прогнозирования получают заблаговременно один раз, используя обучающую выборку. Чтобы определить тепловое сопротивление кристалл–корпус для экземпляра, не являющегося представителем обучающей выборки, необходимо у этого экземпляра измерить значения электрических параметров, используемых в качестве признаков, и подставить результаты измерения в полученную модель прогнозирования.

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. Н. Цырельчук, Е. Н. Шнейдеров, А. И. Бересневич; под ред. С. М. Боровикова; УО «БГУИР». – Минск : МГВРК, 2010. – 308 с.
3. Боровиков, С. М. *Индивидуальное прогнозирование надёжности транзисторов большой мощности для электронных устройств медицинского назначения* / С. М. Боровиков, В. О. Казюцки // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 1. – С. 88-95. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-88-95>.
4. *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.
5. *Прогнозирование надёжности изделий электронной техники методом пороговой логики* / С. М. Боровиков, А. И. Бересневич, А. А. Хмыль, А. В. Емельянов, И. Н. Цырельчук // Доклады БГУИР. – 2006. – № 2(14). – С. 49–56.
6. Казюцки, В. О. *Эвристическая модель прогнозирования работоспособности полупроводниковых приборов* / В. О. Казюцки, С. М. Боровиков, Е. Н. Шнейдеров // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 92-100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-92-100>.
7. Казюцки, В. О. *Поиск информативных параметров как одна из задач процедуры индивидуального прогнозирования надёжности полупроводниковых приборов* / В. О. Казюцки, С. М. Боровиков, Е. Н. Шнейдеров // *Интернаука : научный журнал*. – 2021. – № 15(191), Ч. 2. – С. 11-16. DOI:10.32743/26870142.2021.15.191.265348.
8. *Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры* / Б. Е. Бердичевский, Л. Г. Дубицкии, Г. М. Сушенцев, А. П. Агеев; под ред. Б.Е. Бердичевского. – М. : Сов. радио, 1976. – 296 с.

UDC 621.382 + 681.2

DETERMINATION OF THE THERMAL RESISTANCE OF JUNCTION-CASE OF POWERFUL SEMICONDUCTOR DEVICES BY INDIRECT FEATURES USING REGRESSION EQUATION

Kaziuchyts V.O.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Borovikov S.M. – PhD, assistant professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. On the example of high-power field-effect transistors of the KP744A type, the possibility of estimating of the thermal resistance of the crystal-case is shown using indirect electrical parameters substituted into the prediction model in the form of a regression equation.

Keywords. semiconductor devices, reliability, individual prediction, informative parameters, thermal resistance of the crystal-case, regression equation