

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

¹Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь

²Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», г. Минск, Республика Беларусь

Материалы доклада подготовлены по результатам выполнения проекта № Т20МВ-026 на тему «Прогнозирование эксплуатационной надежности мощных полупроводниковых приборов с использованием методов и алгоритмов машинного обучения», утвержденного 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 надежности электронных систем» научно-исследовательской части (НИЧ) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Многие электронные устройства систем телекоммуникаций содержат в своем составе биполярные транзисторы большой мощности (источники питания, генераторы излучений, схемы управления), которые во многом определяют надежность электронных изделий. Поэтому выполнение процедуры прогнозирования надежности для биполярных транзисторов является актуальной задачей [1].

Одним из способов получения экземпляров (транзисторов) повышенного уровня надежности является их отбор из изготовленных партий путем индивидуального прогнозирования безотказности по информативным параметрам [2]. Технология отбора после получения прогнозирующего правила такова: в начальный момент времени у конкретного экземпляра измеряют значения информативных параметров, обрабатывают результаты измерения по прогнозирующему правилу, и принимают решение о соответствии или несоответствии данного экземпляра требованию повышенного уровня надежности. Отметим, что изготовленные элементы (транзисторы) прошли выходной контроль на заводе-изготовителе и в начальный момент времени отвечают требованиям технической документации, однако экземпляры отличаются друг от друга по уровню надежности (времени до отказа). Прогнозирующее правило получают с помощью предварительных исследований выборки элементов (примерно 50...100 экземпляров). Эти исследования являются обучающим экспериментом [2]. Суть такого эксперимента состоит в измерении в начальный момент времени у каждого экземпляра обучающей выборки значений информативных параметров и проведении ускоренных (обычно форсированных) испытаний в течение времени, которое эквивалентно наработке элементов, указанной в документации, или заданной заказчиком электронной аппаратуры.

В качестве исследуемых элементов рассматривались биполярные транзисторы большой мощности типа КТ872А. Был спланирован и выполнен обучающий эксперимент, используя результаты которого, определены наиболее информативные параметры из числа исследуемых. Решение о степени информативности принималось по значению модуля коэффициента парной корреляции между электрическим параметром в начальный момент времени и номером класса на момент окончания испытаний (1 – класс надежных экземпляров, обозначен как K_1 , или 2 – класс потенциально ненадежных экземпляров, обозначен как K_2). Также принимались во внимание значения информационной меры Кульбака $D(x_i)$, определяемой по выражению [2]:

$$D(x_i) = \frac{[M(x_i | K_1) - M(x_i | K_2)]^2}{\sigma^2(x_i | K_1) + \sigma^2(x_i | K_2)}, \quad (1)$$

где $M(x_i | K_1)$, $M(x_i | K_2)$ – математические ожидания (средние значения) параметра x_i , для экземпляров соответственно класса K_1 и класса K_2 ; $\sigma(x_i | K_1)$, $\sigma(x_i | K_2)$ – стандартные отклонения x_i для экземпляров соответственно класса K_1 и класса K_2 .

В таблице 1 для наиболее информативных параметров, из числа исследуемых на информативность, приводятся рассчитанные коэффициенты линейной корреляции с номером класса, а также значения информационной меры Кульбака.

Таблица 1 – Информативные параметры

Параметр	Режим измерения	Условное обозначение	Коэффициент корреляции	Мера Кульбака $D(x_i)$	Пороговый уровень x_{i0}	Условие получения $z_i = 1$
$h_{21Э}$	$I_K = 7 \text{ А}$	x_1	0,452	0,498	3,38	$\geq x_{10}$
$I_{КЭО}$	$U_{КЭО} = 500 \text{ В}$	x_2	0,453	0,487	0,22 мкА	$\leq x_{20}$
$U_{КЭнас}$	$I_K = 7 \text{ А},$ $I_B = 3,5 \text{ А}$	x_3	0,443	0,435	598 мВ	$\leq x_{30}$

Обозначение параметров, включенных в таблицу 1, по ГОСТ 20003-74: $h_{21Э}$ – статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером, $I_{КЭО}$ – обратный ток коллектора, $U_{КЭнас}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер. Если измеренное значение параметра x_i не отвечало условию последнего столбца таблицы 1, то принималось $z_i = 0$.

Для получения прогнозирующего правила использован метод пороговой логики [2], согласно которому значения информативных параметров x_1 , x_2 и x_3 преобразовывались в двоичные числа z_1 , z_2 и z_3 (единицу или нуль), пользуясь заранее найденными по результатам обучающего эксперимента пороговыми уровнями x_{i0} (см. таблицу 1). Пороговые уровни x_{10} , x_{20} , x_{30} и соотношения для преобразования выбирались таким образом, чтобы экземплярам повышенного уровня надежности (класс K_1) в основном соответствовали значения $z_i = 1$, а потенциально ненадежным экземплярам (класс K_2) – значения $z_i = 0$.

Для каждого j -го экземпляра обучающей выборки ($j = 1, 2, 3, \dots$) был получен набор двоичных чисел $z_1(j)$, $z_2(j)$, $z_3(j)$ и этому набору поставлено в соответствие значение решающей функции $F(j)$. При этом функция F строилась так, чтобы для экземпляров обучающей выборки ее большие значения в основном отвечали экземплярам класса K_1 , а меньшие значения – экземплярам класса K_2 [2].

Для получения значений решающей функции F применен новый способ, основанный на использовании понятий «частная информация о событии», содержащаяся в сообщении о другом событии [2]. Применительно к прогнозированию по информативным параметрам в качестве таких понятий рассматривалась частная информация о принадлежности экземпляра к классу K_1 [обозначена как $I(K_1 | z_i = \xi)$] и частная информация о принадлежности этого же экземпляра к классу K_2 [обозначена как $I(K_2 | z_i = \xi)$], содержащаяся в сообщении о том, что i -й двоичный сигнал z_i принял конкретное значение $z_i = \xi$ (ξ принимает значение 1 или же 0).

Используемый алгоритм получения $F(j)$ учитывает информацию, которую содержит полученный набор двоичных чисел $z_1(j)$, $z_2(j)$ и $z_3(j)$ как о классе K_1 , так и о классе K_2 :

$$F^{(j)} = \sum_{i=1}^k I(K_1 | z_i^{(j)} = \xi) - \sum_{i=1}^k I(K_2 | z_i^{(j)} = \xi) = \sum_{i=1}^k \log \frac{P(K_1 | z_i^{(j)} = \xi)}{P(K_1)} - \sum_{i=1}^k \log \frac{P(K_2 | z_i^{(j)} = \xi)}{P(K_2)}, \quad (2)$$

где k – число используемых информативных параметров и, следовательно, двоичных чисел z_i ; $P(K_s | z_i^{(j)} = \xi)$ – вероятность принадлежности экземпляра к классу K_s при условии, что в результате преобразования информативного параметра $x_i^{(j)}$ j -го экземпляра в двоичное число $z_i^{(j)}$ последнее приняло значение, равное ξ ($\xi = 1$ или $\xi = 0$); $P(K_s)$ – начальная вероятность принадлежности экземпляра к классу K_s ($s = 1$ или $s = 2$).

Авторы доклада будут благодарны за критические замечания относительно эффективности и целесообразности использования для прогнозирования надежности биполярных транзисторов информативных параметров и алгоритма вида (2).

Теория связи, сети и системы электросвязи

ЛИТЕРАТУРА

1. Харченко, В. А. Проблемы надежности электронных компонентов / В. А. Харченко // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015, № 18(1). – С. 52-57.
2. Боровиков, С. М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники: монография / С. М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.