

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПО ПОСТЕПЕННЫМ ОТКАЗАМ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Калита Елена Викторовна

*ассистент,
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*

Бересневич Андрей Игоревич

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

PREDICTION OF RELIABILITY OF BIPOLAR TRANSISTORS BY GRADUAL FAILURES BY SIMULATIONS

Elena Kalita

*Assistant, 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*

Andrei Berasnevich

*Master of Engineering, Senior Lecturer,
Belarusian State University of
Informatics and Radioelectronics,
Republic of Belarus, Minsk*

АННОТАЦИЯ

На примере биполярных транзисторов показано получение по результатам обучающего эксперимента имитационной модели в виде функции пересчёта заданной наработки на значение имитационного воздействия. Используя имитационную модель, выполнено индивидуальное прогнозирование электрического параметра транзисторов контрольной выборки для длительных наработок с последующей оценкой ошибки прогнозирования.

ABSTRACT

Using the example of bipolar transistors, it is shown that, based on the results of a training experiment, a simulation model is obtained in the form of a function of recalculating a given operating time by the value of a simulation effect. Using a simulation model, an individual prediction of the electrical parameter of the transistors of the control sample for long-term operating time was performed, followed by an estimate of the prediction error.

Ключевые слова: биполярный транзистор, ускоренные испытания надёжность, имитационная модель.

Keywords: bipolar transistors, reliability, simulation effect, electrical parameter model, simulation model.

При использовании метода имитационного моделирования решение о прогнозном значении интересующего электрического функционального пара-

метра конкретного экземпляра для заданной наработки и, следовательно, надёжности транзистора по постепенным отказам, принимают по результатам

измерения в начальный момент времени ($t = 0$) значения этого параметра при наличии на прогнозируемом экземпляре имитационного воздействия, уровень которого для заданной наработки транзисторов был рассчитан по заранее полученной имитационной модели. Имитационную модель для транзисторов конкретного типа получают один раз в виде функции пересчёта заданной (интересующей) наработки t на значение имитационного воздействия F . Решение о пригодности функции пересчёта и эффективности метода прогнозирования принимают по значению средней ошибки прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}(t)$ значения электрического функционального параметра (обобщённо P) для заданной наработки t . Оценку этой ошибки для заданной наработки t предложено определять с использованием контрольной выборки по формуле [1, с. 247]

$$\Delta_{\text{ср}}(t) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{P_{\text{пр}i} - P_{\text{ист}i}}{P_{\text{ист}i}} \right)^2} \times 100 \% , \quad (1)$$

где m – объём контрольной выборки; $P_{\text{пр},i}$ – прогнозируемое значение электрического параметра P для заданной наработки t , соответствующее i -му экземпляру контрольной выборки транзисторов; это значение получают путём измерения P при наличии на этом экземпляре в момент времени $t = 0$ имитационного воздействия такого уровня, который найден по

имитационной модели с учётом заданной наработки t ; $P_{\text{ист},i}$ – истинное значение электрического параметра P i -го экземпляра контрольной выборки для заданной наработки t ; это значение получают в результате испытаний биполярных транзисторов на длительную наработку.

Если средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}(t) \leq 7 \dots 10 \%$, то результаты прогнозирования считают приемлемыми для практики. Контрольная выборка – это та выборка однотипных биполярных транзисторов, которая используется сугубо для оценки ошибок прогнозирования. Отметим, что испытания обучающей и контрольной выборок целесообразно проводить одновременно с целью экономии времени и средств на проведение ускоренных испытаний. Для этого случайным образом формируется выборка транзисторов рассматриваемого типа. Её общий объём N включает обучающую (объёмом n) и контрольную (объёмом m) выборки. Результаты испытаний первой выборки используют для получения имитационной модели, второй – только для определения ошибки прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}(t)$. Вначале проводят эксперимент с использованием имитационного воздействия. При различных значениях имитационного фактора F (примерно в $5 \dots 7$ точках) у каждого экземпляра обеих выборок измеряют интересующий параметр P . Для удобства дальнейшего анализа результаты измерений сводят в таблицы. В качестве примера показана форма записи для экземпляров контрольной выборки (таблица 1).

Таблица 1.

Форма записи данных о зависимости значения параметра P экземпляров контрольной выборки от имитационного фактора F

Значение F	Значение параметра P для экземпляра контрольной выборки:			
	1	2	...	m
F_1	$P_1(F_1)$	$P_2(F_1)$...	$P_m(F_1)$
F_2	$P_1(F_2)$	$P_2(F_2)$...	$P_m(F_2)$
...
F_l	$P_1(F_l)$	$P_2(F_l)$...	$P_m(F_l)$

В таблице 1 число точек имитационного фактора обозначено символом l .

Используя данные табл. 1 и прикладные программы для ПЭВМ, для каждого экземпляра контрольной выборки получают математическую модель вида

$$P_i = f(F); \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

где f – символ функциональной связи, вид которой определяется прикладной компьютерной программой.

Получаемые модели (2) могут быть одинакового математического вида, но для разных экземпляров контрольной выборки иметь разные значения коэффициентов, входящих в модели.

Используя результаты измерений, аналогичные табл. 1, но для экземпляров обучающей выборки, получают модель вида

$$P_{\text{ср}} = f_1(F), \quad (3)$$

где $P_{\text{ср}}$ – значение электрического параметра P , усреднённое с использованием всех экземпляров обучающей выборки; f_1 – символ функциональной зависимости, описывающей изменение $P_{\text{ср}}$ от имитационного воздействия F .

Далее проводят ускоренные испытания объединённой выборки объёмом N на длительную наработку и для каждого экземпляра этой выборки контролируют значение электрического параметра P в наблюдаемых точках наработки t_1, t_2, \dots, t_k , где k – выбранное число точек наработки. Используя результаты ускоренных испытаний обучающей выборки, получают данные, приведённые в таблице 2

Таблица 2.

Форма записи данных о зависимости среднего значения электрического параметра (P_{cp}) экземпляров обучающей выборки от наработки t

Значение наработки t , ч	Усреднённое по всем экземплярам обучающей выборки значение электрического параметра P
t_1	$P_{\text{cp}}(t_1)$
t_2	$P_{\text{cp}}(t_2)$
.....
t_k	$P_{\text{cp}}(t_k)$

По данным таблицы 2 с помощью прикладных компьютерных программ получают математическую модель вида

$$P_{\text{cp}} = f_2(t), \quad (4)$$

где f_2 – символ функциональной зависимости, описывающей изменение P_{cp} от наработки t .

Используя модели (3) и (4), приёмами, описанными в [1, с. 216-218], получают имитационную модель в виде функции пересчёта заданной наработки t на значение имитационного воздействия F .

При определении средней ошибки прогнозирования $\Delta_{\text{cp}}(t)$ с использованием формулы (1) истин-

ные значения электрического функционального параметра $P_{\text{ист},i}$ экземпляров контрольной выборки для заданной наработки t получают непосредственно в процессе испытаний на длительную наработку объединённой выборки. Прогнозные значения параметра P для заданной наработки t (обозначены как $P_{\text{пр},i}$) придётся определять для каждого экземпляра контрольной выборки по ранее полученным моделям (2), используя интерполяцию. При этом необходимо принимать во внимание значения P , соответствующие экспериментальным точкам имитационного фактора F , между которыми окажется значение имитационного уровня $F_{\text{им}}$, рассчитанное по полученной имитационной модели для интересующей наработки t (рисунок 1).

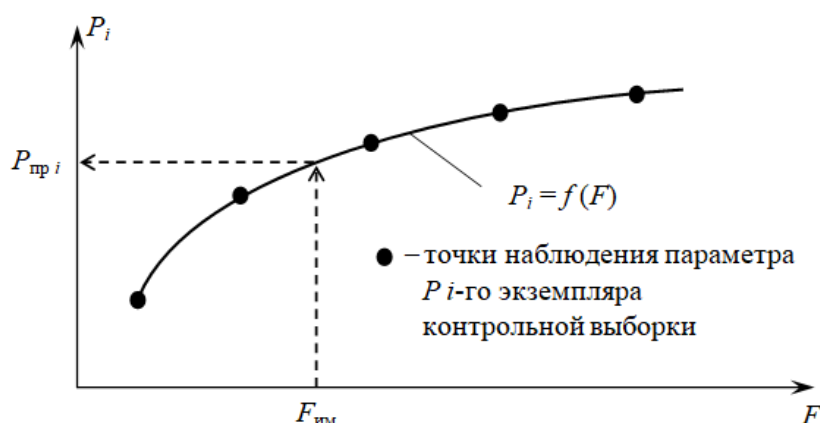


Рисунок 1. Определение прогнозного значения параметра P_i -го экземпляра с использованием расчётного значения $F_{\text{им}}$ имитационного воздействия

Ниже показано применение метода имитационного моделирования для прогнозирования значений электрического параметра биполярных транзисторов с оценкой средней ошибки прогнозирования для заданных наработок.

В качестве электрического функционального параметра, по значению которого принималось решение о надёжности биполярных транзисторов для заданных наработок, рассматривалось напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($U_{\text{КЭнас}}$) транзисторов большой мощности типа КТ872А. В качестве имитационного воздействия использовался ток коллектора транзистора ($F \rightarrow I_{\text{К}}$). Отметим, что следует различать понятия рабочего и имитационного тока или напряжения. Рабочий ток и напряжение имеют место при работе транзисторов в электрической схеме. Имитационные ток или напряжение используют в начальный момент времени для получения

информации о возможном значении электрического функционального параметра при длительной наработке транзистора. После «снятия» имитационного тока или напряжения электрический функциональный параметр прогнозируемого экземпляра принимает своё начальное значение. Исследуемая выборка транзисторов включала 200 экземпляров, 100 из которых, выбранные случайным образом, представляли обучающую выборку, а другие 100 – контрольную.

Обучающий эксперимент состоял в следующем. У каждого экземпляра как обучающей, так и контрольной выборки в начальный момент времени ($t = 0$) снималась зависимость параметра $U_{\text{КЭнас}}$ от тока коллектора $I_{\text{К}}$ в диапазоне от 0,01 до 8 А. Затем вся выборка биполярных транзисторов испытывалась на длительную наработку. Использовались ускоренные испытания, выполняемые по типовым методикам.

Время ускоренных испытаний t_y составляло 216 ч, что эквивалентно наработке $t = 15000$ ч в нормальных условиях работы. После этого с использованием экземпляров обучающей выборки строились математические модели видов (3) и (4) с учётом того, что $P \rightarrow U_{KЭнас}$, $F \rightarrow I_K$.

Модели (3) и (4) были получены в виде следующих аналитических зависимостей среднего значения параметра $U_{KЭнас}$ от тока коллектора I_K и от наработки t [2]:

$$U_{KЭнас} = 21,4 \cdot (I_K)^{1,63} + 67, \text{ мВ}, \quad (5)$$

$$U_{KЭнас} = 2,19 \cdot \sqrt{t} + 605, \text{ мВ}, \quad (6)$$

где наработка t должна подставляться в часах.

Размерность параметров выражений (5) и (6): $[U_{KЭнас}] = \text{мВ}$; $[I_K] = \text{А}$; $[t] = \text{ч}$.

Экземпляры контрольной выборки использовались только для оценки ошибок прогнозирования

электрического параметра $U_{KЭнас}$ для заданных наработок.

Функция пересчёта наработки транзистора t на значение имитационного тока $I_{Kим}$ (имитационная модель), полученная с использованием моделей (5) и (6), приняла вид

$$I_{Kим} = (0,102\sqrt{t} + 25,14)^{0,6135}, \text{ А}. \quad (7)$$

По модели (7) для заданной наработки, например $t = 20000$ ч, путём расчёта получаем $I_{Kим} = 9,55$ А. Предположим, что измерение параметра $U_{KЭнас}$ у конкретного экземпляра при этом токе коллектора дало результат $U_{KЭнас} = 936$ мВ. Сравнивая это значение с нормой (не более 1000 мВ) делаем вывод, что данный экземпляр для наработки 20000 ч будет отвечать требованию надёжности по постепенным отказам. Средние ошибки прогнозирования $\Delta_{cp}(t)$, полученные по формуле (1), для пяти значений наработки t приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{cp}(t)$ для параметра $U_{KЭнас}$

$t, \text{ ч}$	3330	7220	11100	13050	15000
$\Delta_{cp}(t), \%$	8,3	7,9	9,1	8,8	9,7

Из таблицы 3 видно, что функция пересчёта (имитационная модель) вида (7) является пригодной для выполнения прогнозирования, так как в случае её использования ошибка прогнозирования $\Delta_{cp}(t) \leq 10\%$ для всего диапазона рассмотренных наработок от 3330 до 15000 ч.

Список литературы:

1. Боровиков, С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники: монография. – М.: Новое знание, 2013. – 343 с.
2. Боровиков С.М., Будник А.В., Калита Е.В., Бересневич А.И. Модель прогнозирования постепенных отказов биполярных транзисторов большой мощности методом имитационных воздействий для аппаратуры систем телекоммуникаций / Современные средства связи: материалы XXVII Международ. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 октября 2022 года / Белорусская государственная академия связи. – Минск: БГАС, 2022. – С. 173-175.

Вывод. Полученные в работе результаты показывают, что методом имитационного моделирования можно в начальный момент времени ($t = 0$) получать прогноз значений электрического параметра биполярных транзисторов для заданных наработок с достоверностью, приемлемой для практики.