

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ НАРАБОТОК

Калита Е.В.

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

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

Аннотация. Рассматривается применение метода имитационного моделирования, позволяющего для биполярных транзисторов (с помощью предварительных исследований) получить модель для расчёта имитационного воздействия, вызывающего примерно такое же изменение электрического функционального параметра транзисторов, как и заданная длительная их наработка. Это позволяет в качестве прогнозного значения электрического параметра рассматривать результат его измерения при наличии на транзисторе имитационного воздействия, соответствующего заданной наработке.

Ключевые слова: биполярный транзистор, имитационное воздействие, имитационная модель, прогнозирование электрического параметра, надёжность по постепенным отказам.

Введение. Полупроводниковые приборы, в том числе транзисторы, составляют заметную долю в составе электронной аппаратуры разного назначения. Надёжность ответственной электронной аппаратуры длительного функционирования во многом определяется надёжностью биполярных транзисторов большой мощности, используемых в составе этой аппаратуры. Для такой электронной аппаратуры актуальным является отбор в начальный момент времени экземпляров (транзисторов), обеспечивающих требование к надёжности по постепенным отказам для заданной наработки.

В данной статье автором рассмотрен метод прогнозирования, который позволяет в начальный момент времени дать ответ на вопрос о прогнозном значении электрического функционального параметра конкретного экземпляра (транзистора) для заданной наработки при его длительном функционировании. Зная норму, записанную на электрический параметр в технической документации или указанную заказчиком, это позволит принять решение о соответствии или несоответствии экземпляра требованию надёжности по постепенным отказам для интересующей наработки.

Основная часть. Для ответа на вопрос о прогнозном значении электрического функционального параметра (обозначим его через P) для заданной наработки может быть использован метод имитационного моделирования постепенных отказов для заданной наработки, называемый также методом имитационных воздействий [1, 2]. Метод предусматривает предварительные исследования интересующего типа транзисторов. Эти исследования называют обучающим экспериментом и используют для получения имитационной модели, которая представляет собой функцию пересчёта заданной наработки на значение имитационного воздействия. Используя модель, можно рассчитать имитационный уровень воздействия, вызывающего примерно такое же изменение электрического функционального параметра транзисторов, как и заданная длительная их наработка.

В дальнейшем само прогнозирование выполняют для однотипных экземпляров, не принимавшим участия в предварительных исследованиях. Получение прогнозного значения электрического функционального параметра сводится к измерению у конкретного экземпляра (транзистора) значения этого параметра в условиях наличия на транзисторе имитационного воздействия, уровень которого рассчитан по полученной имитационной модели в зависимости от заданной наработки.

После получения имитационной модели метод фактически позволяет по реакции электрического функционального параметра на имитационное воздействие получить прогнозное значение этого параметра для интересующей заданной наработки. В качестве прогнозного значения электрического функционального параметра транзистора для заданной наработки t рассматривается результат измерения этого параметра в начальный момент времени при наличии на экземпляре имитационного воздействия такого уровня $F_{им}$, который рассчитан по полученной имитационной модели для заданной (интересующей) наработки t .

Имитационную модель для транзисторов конкретного типа получают один раз. Решение о пригодности функции пересчёта и эффективности самого метода прогнозирования принимают по значению средней ошибки прогнозирования $\Delta_{cp}(t)$, зависящей от наработки t . Оценка этой ошибки выполняется по формуле [1, 2]

$$\Delta_{cp}(t) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{P_{при i} - P_{исти i}}{P_{исти i}} \right)^2} \times 100\%, \quad (1)$$

где m – объём контрольной выборки;

$P_{при i}$ – прогнозное значение электрического параметра P для заданной наработки t , соответствующее i -му экземпляру контрольной выборки транзисторов; это значение получают путём измерения P при наличии на экземпляре в момент времени $t = 0$ имитационного воздействия такого уровня, который найден по имитационной модели с учётом наработки t ;

$P_{исти i}$ – истинное значение электрического параметра P i -го экземпляра контрольной выборки для заданной наработки t ; это значение получают в результате ускоренных испытаний биполярных транзисторов на длительную наработку.

Если средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{cp}(t) \leq 7...10\%$, то полученную имитационную модель считают пригодной для индивидуального прогнозирования электрического функционального параметра однотипных экземпляров, не принимавшим участия в предварительных исследованиях, то есть не являющимися представителями обучающей или контрольной выборок [1, 2].

Контрольная выборка – это выборка однотипных биполярных транзисторов рассматриваемого типа, используемая сугубо для оценки средней ошибки прогнозирования, определяемой по формуле (1). Следует отметить, что испытания обучающей и контрольной выборок целесообразно проводить одновременно, чтобы сэкономить время и средства для проведения ускоренных испытаний.

Опишем последовательность применения метода прогнозирования. Формируется случайная выборка рассматриваемых транзисторов, общий объём которой N состоит из двух случайных выборок: обучающей объёмом n и контрольной объёмом m . Результаты проведенных испытаний первой выборки используют для получения имитационной модели, результаты второй – для определения ошибки прогнозирования $\Delta_{cp}(t)$.

Далее выбирается и обосновывается имитационный фактор (физический вид воздействия), в качестве которого может рассматриваться температура, электрический параметр, например ток коллектора биполярных транзисторов и др. Проводится эксперимент с использованием имитационного воздействия. Суть этого эксперимента: при различных значениях имитационного фактора F (примерно в 5...7 точках) у каждого экземпляра обеих выборок измеряют интересующий электрический функциональный параметр P . Для удобства дальнейшего анализа результаты этих измерений сводят в таблицы. В качестве примера показана форма записи измерений 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 таблицы 1 и прикладные программы для ПЭВМ, для каждого экземпляра контрольной выборки получают математическую модель вида:

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

где f – символ функциональной связи.

Получаемые модели (2) обычно имеют одинаковый математический вид, но для разных экземпляров контрольной выборки значения коэффициентов, входящих в модель, могут отличаться.

Используя результаты измерений, аналогичные таблице 1, но для экземпляров обучающей выборки, получают модель вида:

$$P_{cp} = f_1(F), \quad (3)$$

где P_{cp} – значение электрического параметра P , усреднённое с использованием всех экземпляров обучающей выборки;

f_1 – символ функциональной зависимости, описывающей изменение P_{cp} от имитационного воздействия F .

Затем проводятся 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	$P_{cp}(t_1)$
t_2	$P_{cp}(t_2)$
...	...
t_k	$P_{cp}(t_k)$

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

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

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

Используя модели (3) и (4), приёмами, описанными в [1, 2], получают имитационную модель в виде функции пересчёта заданной наработки t на значение имитационного воздействия F . С получением и использованием имитационных моделей можно ознакомиться в работах [1–3]. В работе [3] описано исследование транзисторов большой мощности типа КТ872А.

Рассматриваемый электрический функциональный параметр $P \rightarrow U_{КЭнас}$ (напряжение насыщения коллектор–эмиттер). В качестве имитационного воздействия выбран ток коллектора $F \rightarrow I_{К.им}$. Имитационная модель, полученная с использованием найденных для исследуемых транзисторов выражений, аналогичных (3) и (4), приняла вид

$$I_{К.им} = \left(0,102\sqrt{t} + 25,14\right)^{0,6135}, \text{ А.} \quad (5)$$

Средняя ошибка прогнозирования с использованием контрольной выборки в диапазоне наработок до 20000 ч составила не более $\Delta_{ср}(t) = 5,7\%$. Тогда, по модели (5) для заданной наработки, например $t = 20000$ ч, путём расчёта получаем $I_{К.им} = 9,55$ А. Предположим, что измерение электрического параметра $U_{КЭнас}$ у конкретного экземпляра при этом токе коллектора дало результат $U_{КЭнас} = 936$ мВ, который должен рассматриваться в качестве прогноза параметра $U_{КЭнас}$ экземпляра для наработки $t = 20000$ ч. Сравнивая прогнозное значение $U_{КЭнас} = 936$ мВ с нормой, приводимой в документации (не более 1000 мВ), делаем вывод, что данный экземпляр для наработки 20000 ч будет отвечать требованию надёжности по постепенным отказам.

Заключение. Рассмотрен метод, позволяющий для биполярных транзисторов в начальный момент времени получать прогнозные значения электрического функционального параметра, соответствующего заданной наработке. Основу метода составляет получение имитационной модели в виде функции пересчёта заданной наработки на значение имитационного фактора. Прогнозное значение электрического параметра для заданной наработки применительно к новому однотипному экземпляру получают путём измерения электрического параметра в начальный момент времени при наличии на экземпляре воздействия, соответствующего имитационному уровню.

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. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники / С.М. Боровиков [и др.]; под ред. С.М. Боровикова. – Минск: МГВРК, 2010. – 308 с.
3. Калита, Е.В. Прогнозирование надёжности биполярных транзисторов по постепенным отказам методом имитационного моделирования = Prediction of reliability of bipolar transistors by gradual failures by simulations / Е.В. Калита, С.М.Боровиков, А.И. Бересневич // Интернаука: научный журнал. – 2023. – № 8(278). – Ч. 3. – С. 19–22.

UDC 004.42+004.3'122+621.391.82

METHOD FOR PREDICTING THE VALUES OF THE ELECTRIC FUNCTIONAL PARAMETER OF BIPOLAR TRANSISTORS FOR A GIVEN OPERATING TIME

Kalita E.V.

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

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

Annotation. The application of the simulation method is considered, which allows for bipolar transistors (with the help of preliminary studies) to obtain a model for calculating a simulation effect that causes approximately the same change in the electrical functional parameter of transistors as their given long-term operating time. This allows us in the presence of a simulation effect on the transistor to consider the result of an electrical parameter measurement as its a predictive value of corresponding to a given operating time.

Keywords: bipolar transistor, simulation effect, simulation model, electrical parameter prediction, gradual failure reliability.