

**МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ БИПОЛЯРНЫХ
ТРАНЗИСТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

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

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

Обеспечение эксплуатационной надежности электронных устройств систем телекоммуникаций методами прогнозирования надежности комплектующих элементов является важной технической задачей. В работе [1] показано, как можно прогнозировать надежность полупроводниковых приборов большой мощности по внезапным отказам. Для электронной аппаратуры систем телекоммуникаций длительного функционирования актуальным является также индивидуальное прогнозирование надежности полупроводниковых приборов по постепенным отказам. Одним из подходов к обеспечению высокой надежности электронной аппаратуры длительного функционирования является отбор экземпляров, отвечающих требованию по постепенным отказам. Способом, с помощью которого можно выполнить отбор экземпляров, отвечающих требованию по надежности, является метод имитационных воздействий [2]. Для практического применения этого метода необходимо с помощью предварительных исследований выборки транзисторов интересующего типа получить

имитационную модель, показывающую какой заданной наработке t соответствует уровень фактора F , выбранного в качестве имитационного воздействия $F_{им}$:

$$F_{им} = f(t), \quad (1)$$

где f – символ функциональной связи.

Для прогнозирования возможного постепенного отказа и отбора экземпляров, отвечающих требованию по надежности, вначале по модели (1) необходимо рассчитать имитационное значение фактора F для заданной наработки t_3 . После этого у контролируемого (прогнозируемого) экземпляра измеряют значение интересующего функционального электрического параметра P . Результат измерения рассматривают в качестве прогноза параметра P для заданной наработки t_3 . Сравнивая полученное прогнозное значение P с нормой документации или требованиями заказчика, принимают решение о соответствии или несоответствии контролируемого экземпляра (транзистора) требованию по постепенным отказам для наработки t_3 .

В работе [3] было показано, что использование температуры в качестве имитационного воздействия имеет очевидные недостатки и ограничения. В работе [4] обосновывается возможность использования в качестве имитационных факторов параметров электрической нагрузки транзисторов: тока коллектора или обратного напряжения коллектор-эмиттер. При этом следует различать понятия «рабочие ток и напряжение» и «имитационные их уровни». Имитационные уровни используют для получения информации о том, какое прогнозное значение будет иметь функциональный электрический параметр для заданной длительной наработки при работе транзистора в выбранном рабочем режиме работы электрической схеме. Возможность использования тока коллектора в качестве имитационного воздействия показана на примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А. В данном случае ток коллектора рассматривался в роли имитационного воздействия. Решение о соответствии транзисторов требованию по постепенным отказам принималось по функциональному электрическому параметру $U_{КЭнас}$ – напряжению насыщения коллектор-эмиттер.

Для получения модели (1) экспериментально с помощью предварительных исследований выборки транзисторов объемом 100 экземпляров (ее называют обучающей выборкой) были получены зависимости параметра $U_{КЭнас}$ от импульсного тока коллектора I_K и наработки t . Зависимость параметра $U_{КЭнас}$ от тока коллектора I_K приняла вид [4]

$$U_{КЭнас} = 21,4 \cdot (I_K)^{1,63} + 67, \text{ мВ}, \quad (2)$$

где ток коллектора I_K должен подставляться в амперах.

Для получения зависимости параметра $U_{КЭнас}$ от наработки t в выбранном рабочем режиме были проведены ускоренные форсированные испытания экземпляров обучающей выборки. Эти испытания описаны в [5]. Полученная зависимость приняла вид

$$U_{КЭнас} = 2,19 \cdot \sqrt{t} + 605, \text{ мВ}, \quad (3)$$

где наработка t должна подставляться в часах.

Модель (3) описывает изменение параметра $U_{КЭнас}$ применительно к рабочему режиму транзисторов, указанному в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры рабочего режима транзисторов типа КТ872А

Параметр, величина	Значение
1. Постоянная мощность, рассеиваемая коллектором P , Вт	30
2. Напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$, В	150
3. Средний ток коллектора I_K , А	0,2
4. Максимальная температура окружающей среды (корпуса транзистора) $T_{ср}$, °С	+55
5. Интересующая длительная наработка t , ч	15 000

Используя зависимости (2) и (3), получена имитационная модель

$$I_{Ким} = (0,102\sqrt{t} + 25,14)^{0,6135}, \text{ А}. \quad (4)$$

Теория связи, системы и сети передачи данных

Имитационная модель (4) может быть использована для индивидуального прогнозирования значения параметра $U_{КЭнас}$ и, следовательно, возможных постепенных отказов для заданной наработки t . Наработка t должна подставляться в модель (4) в часах. Например, для заданной наработки $t_3 = 20\,000$ ч по модели (4) находим $I_{Ким} = 9,55$ А. Предположим, что измерение параметра $U_{КЭнас}$ у конкретного экземпляра при этом импульсном токе коллектора дало результат $U_{КЭнас} = 936$ мВ. Сравнивая это значение с нормой (не более 1000 мВ) делаем вывод, что данный экземпляр для наработки 20 000 ч будет отвечать требованию надежности по постепенным отказам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прогнозирование надежности биполярных транзисторов для электронных устройств систем телекоммуникаций / В. О. Казючиц, С. М. Боровиков, А. В. Будник, Е. Н. Шнейдеров // Современные средства связи : материалы XXVI Международной научно-технической конференции, Минск, 21–22 октября 2021 г. / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2021. – С. 245–247.

2. Боровиков, С. М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники: монография / С. М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.

3. Калита, Е. В. Выбор имитационных факторов для моделирования постепенных отказов биполярных транзисторов большой мощности / Е. В. Калита, А. И. Бересневич, С. М. Боровиков // Современные средства связи : материалы 21–22 октября 2021 года Минск, Республика Беларусь / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2021.

4. Боровиков, С. М. Моделирование электрического параметра транзисторов при прогнозировании их надежности методом имитационных воздействий / С. М. Боровиков, Е. В. Калита, А. И. Бересневич // Интернаука. – 2022. – № 7 (230). – Ч. 2. – С. 25–30.

5. Ускоренные испытания транзисторов большой мощности на длительную наработку при решении задач прогнозирования их надежности методом имитационных воздействий = Accelerated Testing of High Power Transistors for Long Operation when Solving Problems of Prediction of their Reliability by the Method of Imitation Simulation / В. О. Казючиц, Е. В. Калита, С. М. Боровиков, А. И. Бересневич // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 36–43. – DOI : <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-36-43>.