

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ НАРАБОТОК**

С.М. Боровиков, Е.В. Жук

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники», Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В работе на примере мощных биполярных транзисторов КТ872А показана возможность прогнозирования функциональных параметров биполярных транзисторов для длительных наработок путем использования электрических воздействий, в частности тока коллектора, в качестве имитационного фактора. Прогнозирование возможного значения электрического функционального параметра транзистора (например, коэффициента усиления) для длительной наработки в данном методе сводится к измерению в начальный момент времени у прогнозируемого экземпляра значения его электрического функционального параметра при значении тока коллектора (или обратного напряжения на коллекторе), соответствующим имитационному уровню для заданной наработки. Уровни рассчитывают по функции связи имитационного тока коллектора (или обратного напряжения) с заданной наработкой. Функцию связи получают с помощью предварительных исследования выборки транзисторов рассматриваемого типа. Использование тока или напряжения в качестве имитационных воздействий заметно уменьшают длительность процедуры прогнозирования электрического функционального параметра транзисторов в сравнении с использованием температуры в качестве имитационного воздействия. Предложенный метод не требует сложного и дорогостоящего оборудования, необходимого для получения имитационной температуры и поддержания ее постоянной при измерении функционального параметра прогнозируемого экземпляра.

**Ключевые слова:** биполярный транзистор; индивидуальное прогнозирование электрического функционального параметра; имитационное воздействие; ток коллектора.

## FORECASTING ELECTRICAL FUNCTIONAL PARAMETERS OF BIPOLAR TRANSISTORS FOR LONG-TERM OPERATING TIME

S.M. Borovikov, Y.V. Zhuk

*Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics",  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** The paper uses the example of powerful bipolar transistors KT872A to demonstrate the possibility of predicting the functional parameters of bipolar transistors for long-term operation by using electrical effects, in particular, the collector current, as a simulation factor. Predicting the possible value of the electrical functional parameter of a transistor (for example, the gain) for a long-term operation in this method comes down to measuring the value of the electrical functional parameter of the predicted specimen at the initial moment of time at the value of the collector current (or reverse voltage on the collector) corresponding to the simulation level for the specified operation. The levels are calculated using the coupling function of the simulation collector current (or reverse voltage) depending on the specified operating time. The coupling function is obtained using preliminary studies of a sample of transistors of the type under consideration. Using current or voltage as simulation effects significantly reduces the duration of the procedure for predicting the electrical functional parameter of transistors in comparison with using temperature as a simulation effect. The proposed method does not require complex and expensive equipment necessary for obtaining the simulated temperature and maintaining it constant when measuring the functional parameter of the predicted specimen.

**Keywords:** bipolar transistor; individual prediction of electrical functional parameter; simulation effect; collector current.

### Введение

Прогнозирование постепенного отказа полупроводникового прибора (ППП) основано на информации о возможном значении его электрического функционального параметра для интересующей заданной наработки. Эффективным подходом к получению этой информации является использование метода имитационных воздействий, при котором возможные необратимые изменения электрического параметра для заданной, обычно длительной наработки, воспроизводятся обратимыми изменениями параметра, вызываемыми имитационным воздействием. Традиционно в качестве такого воздействия рассматривают температуру. Однако температура, как имитационное воздействие, имеет недостатки, наиболее существенными из которых являются длительность процедуры индивидуального прогнозирования значения электрического параметра конкретного экземпляра из-за необходимости нагрева или охлаждения прогнозируемого экземпляра до имитационной температуры, соответствующей заданной наработке, а также техническая сложность поддержания имитационного уровня температуры постоянным при измерении значения электрического функционального параметра прогнозируемого экземпляра (единицы ППП). Результат измерения электрического параметра при имитационной температуре рассматривается в качестве прогноза электрического параметра для заданной наработки.

Актуальным является выбор и экспериментальное подтверждение возможности использования других имитационных факторов, позволяющих более эффективно, нежели использование температурных воздействий, выполнять в начальный момент времени индивидуальное прогнозирование значений электрического параметра конкретного экземпляра и, следовательно, надежности этого экземпляра по постепенному отказу для интересующей наработки.

## Основная часть

В отличие от традиционных методов, использующих в качестве имитационных воздействий высокие и/или низкие температуры или радиацию, предложенный подход ориентирует на использование электрических воздействий, такие как ток коллектора или обратное напряжение, которые могут имитировать (вызывать изменения) электрические функциональные параметры при длительной наработке ППП. Электрические функциональные параметры транзисторов заметно реагируют на изменение тока коллектора или обратное напряжение, прикладываемое к коллекторному переходу. При этом, изменения электрических параметров являются обратимыми, не сопровождаются их деградацией. Выполненные ранее исследования [1] подтвердили наличие статистической аналогии между обратимыми изменениями электрического функционального параметра, обусловленные сменой тока коллектора биполярных транзисторов, с одной стороны, и необратимыми изменениями (деградацией) электрического параметра, вызываемые наработкой транзисторов, с другой стороны. Это позволяет по значению электрического функционального параметра (обозначим через  $Y$ ), измеренному при определенном токе коллектора делать вывод о прогнозном значении электрического параметра и, следовательно, о постепенном отказе транзистора по этому параметру для заданной наработки. Для определения имитационного тока коллектора  $I_{\text{КИМ}}$ , соответствующего заданной наработке необходимо иметь функцию пересчета заданной наработки  $t$  на имитационное значение тока коллектора  $I_{\text{КИМ}}$  (будем эту функцию называть имитационной моделью наработки для рассматриваемого электрического параметра  $Y$ ):

$$I_{\text{КИМ}} = f(t), \quad (1)$$

где  $f$  – символ функциональной связи между наработкой  $t$  и имитационным током коллектора  $I_{\text{КИМ}}$ .

Для получения имитационной модели (1) вначале необходимо для транзисторов интересующего типа выполнить предварительные исследования, называемые обучающим экспериментом, а используемую при этом выборку – обучающей выборкой. Суть обучающего эксперимента: вначале необходимо выяснить, как электрический параметр  $Y$  выборки транзисторов рассматриваемого типа в среднем изменяется от тока коллектора  $I_{\text{К}}$ . В данном случае изменения электрического параметра  $Y$  являются обратимыми. Затем, выполняя ускоренные, обычно форсированные испытания, выясняют, как параметр  $Y$  этой же выборки в среднем изменяется от наработки  $t$ . В этом случае изменения  $Y$  являются необратимыми из-за деградации материалов и свойств транзисторов. Имея результаты обучающего эксперимента, получают две следующие модели:

$$Y_{\text{ср}} = f_1(I_{\text{К}}), \quad (2)$$

$$Y_{\text{ср}} = f_2(t), \quad (3)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – символы функциональной связи.

Процедура решения задачи по прогнозированию электрического функционального параметра транзисторов включает следующие этапы [1]: получение математических моделей (2) и (3) для интересующего функционального электрического параметра  $Y$ , используя данные экспериментальных исследований; построение имитационной модели (1) на основе полученных моделей (2) и (3); проверка пригодности имитационной модели для прогнозирования значений параметра  $Y$

и, следовательно, постепенных отказов транзисторов по электрическому параметру  $Y$  для заданных наработок.

Возможность и эффективность прогнозирования значений электрического параметра ППП для заданных наработок с использованием новых имитационных воздействий была исследована на примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А. В качестве электрического функционального параметра  $Y$ , по значению которого принималось решение о постепенном отказе транзисторов, рассматривался коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером ( $h_{21Э}$ ) при рабочем токе коллектора  $I_K = 0,1$  А. В качестве имитационного воздействия (фактора) использовался ток коллектора  $I_K$ .

Для выполнения обучающего эксперимента из партии транзисторов типа КТ872А случайным образом была взята выборка из 100 транзисторов. Для каждого экземпляра этой выборки при комнатной температуре ( $20 \pm 5$  °С) измерялся коэффициент  $h_{21Э}$  при различных значениях тока коллектора в диапазоне 0,03–7 А. Далее экземпляры обучающей выборки подвергались ускоренным форсированным испытаниям на надежность, проводимым по типовым методикам. Коэффициент ускорения испытаний примерно был равен 80. В процессе испытаний в определенные моменты времени измерялись значения  $h_{21Э}$  каждого транзистора обучающей выборки. На рис. 1 приведены графики зависимости среднего значения  $h_{21Э}$  для экземпляров обучающей выборки от тока коллектора  $I_K$  (а) и от времени ускоренных испытаний  $t_y$  (б).

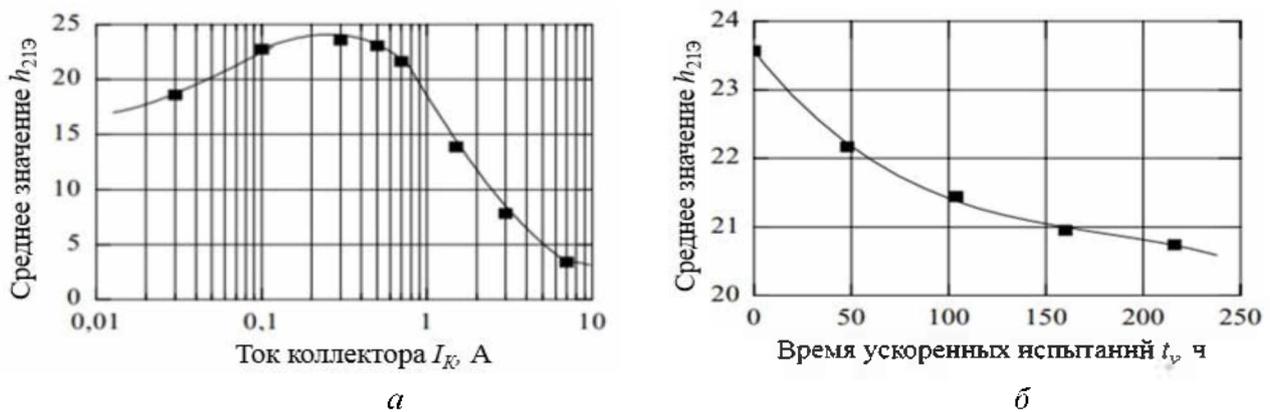


Рис. 1. Зависимость среднего значения коэффициента  $h_{21Э}$  от параметров:  
 а – от тока коллектора; б – от времени ускоренных испытаний  
 Fig. 1. Dependence of the average value of the coefficient  $h_{21Э}$  on the parameters:  
 а – on the collector current; б – on the time of accelerated tests

Для аналитического описания изменения среднего значения  $h_{21Э}$  от тока  $I_K$  и от наработки  $t$ , рассчитанной по времени ускоренных испытаний  $t_y$  с учетом коэффициента ускорения испытаний, получены следующие модели:

$$h_{21Э\text{cp}} = \frac{1}{0,022I_K + 0,037}, \quad (4)$$

$$h_{21Э\text{cp}} = \frac{1}{3,4 \cdot 10^{-7}t + 0,043}, \quad (5)$$

где  $t$  – значение заданной наработки, ч; размерность  $I_K$  – А.

На основе моделей (4) и (5) получена функция пересчета (имитационная модель наработки для электрического параметра  $h_{21Э}$ ):

$$I_{\text{ном}} = 1,545 \cdot 10^{-5} \cdot t + 0,273, \text{ мА}. \quad (6)$$

Индивидуальное прогнозирование электрического параметра  $h_{21Э}$  для заданной наработки  $t$  выполняется с использованием полученной имитационной модели (6). Процедура включает следующие действия. Вначале по модели (6) для заданной наработки  $t$  определяется имитационный ток  $I_{КИМ}$ . Затем у экземпляра (конкретной единицы транзистора), электрическим параметром которого интересуются для наработки  $t$ , измеряется  $h_{21Э}$  при токе коллектора, равном рассчитанному значению  $I_{КИМ}$ . Полученное значение  $h_{21Э}$  (результат измерения при токе  $I_K = I_{КИМ}$ ) принимается в качестве прогнозного значения  $h_{21Э}$  для наработки  $t$ .

Используя имитационную модель (6), можно убедиться, что для наработки  $t = 1000$  ч имитационный ток  $I_{КИМ} = 0,288$  А, а для  $t = 20\ 000$  ч –  $I_{КИМ} = 0,582$  А. Это соответствует изменению тока коллектора примерно на 300 мА в диапазоне наработок 1000–20000 ч при рабочем токе  $I_K = 0,1$  А. Погрешность поддержания  $I_{КИМ}$  в пределах  $\pm 5$  мА приводит к ошибке в выборе прогнозируемой наработки не более 300 ч в указанном диапазоне, что более, чем в 8 раз меньше, нежели в случае использования имитационной температуры  $T_{ИМ}$  при погрешности ее поддержания  $\pm 1,5...1,8$  °С. Кроме того, использование тока коллектора в качестве имитационного воздействия значительно сокращает время процедуры прогнозирования в сравнении с использованием температуры в качестве имитационного воздействия.

### Заключение

Предложенный метод прогнозирования электрических функциональных параметров биполярных транзисторов и, следовательно, возможных постепенных отказов для заданных наработок, с использованием электрических имитационных воздействий является более эффективным, нежели использование температуры в качестве имитационного воздействия. Значительно уменьшается длительность самой процедуры прогнозирования и не требуются дополнительные затраты на покупку специального оборудования, обеспечивающего получение имитационных воздействий.

### Список использованных источников

1. Боровиков С.М. (2013) *Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники*. Москва. Издательство «Новое знание».
2. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Плебанович В.И., Бересневич А.И., Бурак И.А. (2017) Экспериментальное исследование деградации изделий электронной техники. *Доклады БГУИР*. 2 (104), 45–52.

### References

1. Borovikov S.M. (2013) *Statistical Forecasting for Rejection of Potentially Unreliable Electronic Products*. Moscow. New Knowledge Publishing House (in Russian).
2. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Plebanovich V.I., Beresnevich A.I., Burak I.A. (2017) Experimental study of degradation of electronic products. *BSUIR Reports*. 2 (104). 45–52 (in Russian).

### **Сведения об авторах**

**Боровиков С.М.**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», [bsm@bsuir.by](mailto:bsm@bsuir.by),  
**Жук Е.В.**, студент, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,  
[zegor091@gmail.com](mailto:zegor091@gmail.com).

### **Information about the authors**

**Borovikov S.**, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Information and Computer Systems Design, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics",  
[bsm@bsuir.by](mailto:bsm@bsuir.by)  
**Zhuk Y.**, Student, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics",  
[zegor091@gmail.com](mailto:zegor091@gmail.com).