

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ИХ НАДЁЖНОСТИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Боровиков Сергей Максимович

*канд. техн. наук, доц.,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Республика Беларусь, г. Минск*

Калита Елена Викторовна

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

Бересневич Андрей Игоревич

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

SIMULATION OF THE ELECTRICAL PARAMETER OF TRANSISTORS IN PREDICTION OF THEIR RELIABILITY SIMULATION METHOD

Sergei Borovikov

*Candidate of Sciences, Associate Professor,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Republic of Belarus, Minsk*

Elena Kalita

*Assistant,
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

Метод имитационных воздействий позволяет по отклику (реакции) параметра технического изделия на какое-то физическое воздействие спрогнозировать изменение этого параметра на заданное время работы изделия. Для полупроводниковых приборов в качестве имитационного воздействия удобно использовать протекающие токи через p - n -переходы или прикладываемые к переходам напряжения. Уровень имитационного воздействия (тока или напряжения) зависит от заданной наработки и определяется для приборов интересующего типа по заранее полученной (с помощью предварительных экспериментальных исследований) имитационной модели в виде функции пересчёта заданной наработки на имитационное значение тока (напряжения). Прогнозирование значения электрического параметра для заданной наработки и решение о надёжности однотипных экземпляров, не принимавшим участия в предварительных исследованиях, сводится к измерению у конкретного экземпляра электрического параметра при уровне имитационного тока (напряжения), рассчитанном по функции пересчёта для заданной наработки. Для получения имитационной модели необходимо экспериментально вначале получить зависимость электрического параметра приборов интересующего типа от изменений тока (напряжения), а затем зависимость этого же параметра от заданной наработки. Причём изменения электрического параметра, обусловленные током (напряжением), являются обратимыми, а изменения, вызываемые длительной наработкой – необратимыми (деградационными). В работе на примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А показано, как экспериментально найти модель электрического функционального параметра в виде его зависимости от тока коллектора. Наличие этой модели необходимо для определения функции пересчёта заданной наработки транзисторов на имитационный уровень тока коллектора.

ABSTRACT

The method of imitation impacts allows, based on the response (reaction) of a parameter of a technical product to some physical impact, to predict a change in this parameter for a given time of operation of the product. For semicon-

ductor devices, it is convenient to use currents flowing through p-n junctions or voltages applied to junctions as a simulation effect. The level of simulation impact (current or voltage) depends on the specified operating time and is determined for devices of the type of interest according to the simulation model obtained in advance (using preliminary experimental studies) as a function of recalculating the specified operating time for the simulation value of current (voltage). Predicting the value of an electrical parameter for a given operating time and deciding on the reliability of similar specimens that did not take part in preliminary studies is reduced to measuring an electrical parameter for a specific instance at the level of imitation current (voltage) calculated by the recalculation function for a given operating time. To obtain a simulation model, it is necessary to experimentally first obtain the dependence of the electrical parameter of the devices of interest on current (voltage) changes, and then the dependence of the same parameter on a given operating time. Moreover, changes in the electrical parameter due to current (voltage) are reversible, and changes caused by long-term operation are irreversible (degradation). In this work, using the example of high-power bipolar transistors of the KT872A type, it is shown how to experimentally find a model of an electrical functional parameter in the form of its dependence on the collector current. The presence of this model is necessary to determine the function of recalculating the given operating time of transistors to the simulation level of the collector current.

Ключевые слова: биполярные транзисторы, надёжность, имитационное воздействие, модель электрического параметра, функция пересчёта.

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

Введение. Статья подготовлена по результатам выполнения проекта № T20MB-026 на тему «Прогнозирование эксплуатационной надёжности мощных

полупроводниковых приборов с использованием методов и алгоритмов машинного обучения». Проект утверждён Научным советом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований 22 апреля 2020 года по результатам конкурса «БРФФИ–Минобразование М-2020».

Отказы полупроводниковых приборов (ППП), в том числе биполярных транзисторов, могут иметь как внезапный, так и постепенный характер. По литературным данным [1, с. 155] на долю постепенных отказов приходится примерно до 80 процентов всех отказов ППП. В отличие от внезапных отказов, суть которых определена документом [2], постепенные отказы обусловлены постепенными изменениями электрических функциональных параметров (далее кратко – электрические параметры) во времени и могут быть предсказаны. Следовательно, могут быть отобраны ППП с требуемой надёжностью по постепенным отказам. Решение этой задачи имеет первостепенное значение для аппаратуры длительного функционирования. При этом важно в начальный момент времени сделать прогноз о возможном постепенном отказе конкретного экземпляра для интересующей наработки t_n . В этом случае говорят об индивидуальном прогнозировании постепенных отказов. Одним из методов решения таких задач прогнозирования является метод имитационных воздействий. Он позволяет в начальный момент времени по отклику (реакции) электрического параметра конкретного экземпляра (полупро-

водникового прибора) на имитационное воздействие получить прогноз о значении электрического параметра этого экземпляра для наработки t_n и, следовательно, принять решение о соответствии или несоответствии экземпляра требованию к надёжности по постепенным отказам для этой наработки [3, с. 77-80; 4, с. 255].

Метод имитационных воздействий. Процедура индивидуального прогнозирования значения электрического параметра конкретного экземпляра (ППП) для заданной наработки t_n и, следовательно, его надёжности по постепенным отказам методом имитационных воздействий включает ряд этапов, показанных на рисунке 1 [3, с. 79].

Особенностью метода имитационных воздействий является то, что используемое имитационное воздействие не должно приводить к необратимым изменениям электрических параметров ППП, т.е. параметры приборов должны принимать свои первоначальные значения после снятия имитационного воздействия. В процессе наработки изменения электрического параметра носят необратимый характер, имеет место деградация параметров.

Имитационная модель, используемая для прогнозирования, представляет собой математическое выражение, устанавливающее соответствие между наработкой ППП и уровнем имитационного фактора. Её получают с помощью предварительных экспериментальных исследований выборки ППП рассматриваемого типа для электрического параметра, значения которого определяют надёжность ППП по постепенным отказам. Эти исследования называют обучающим экспериментом, а используемую для проведения исследований выборку – обучающей [3, с. 66-67].

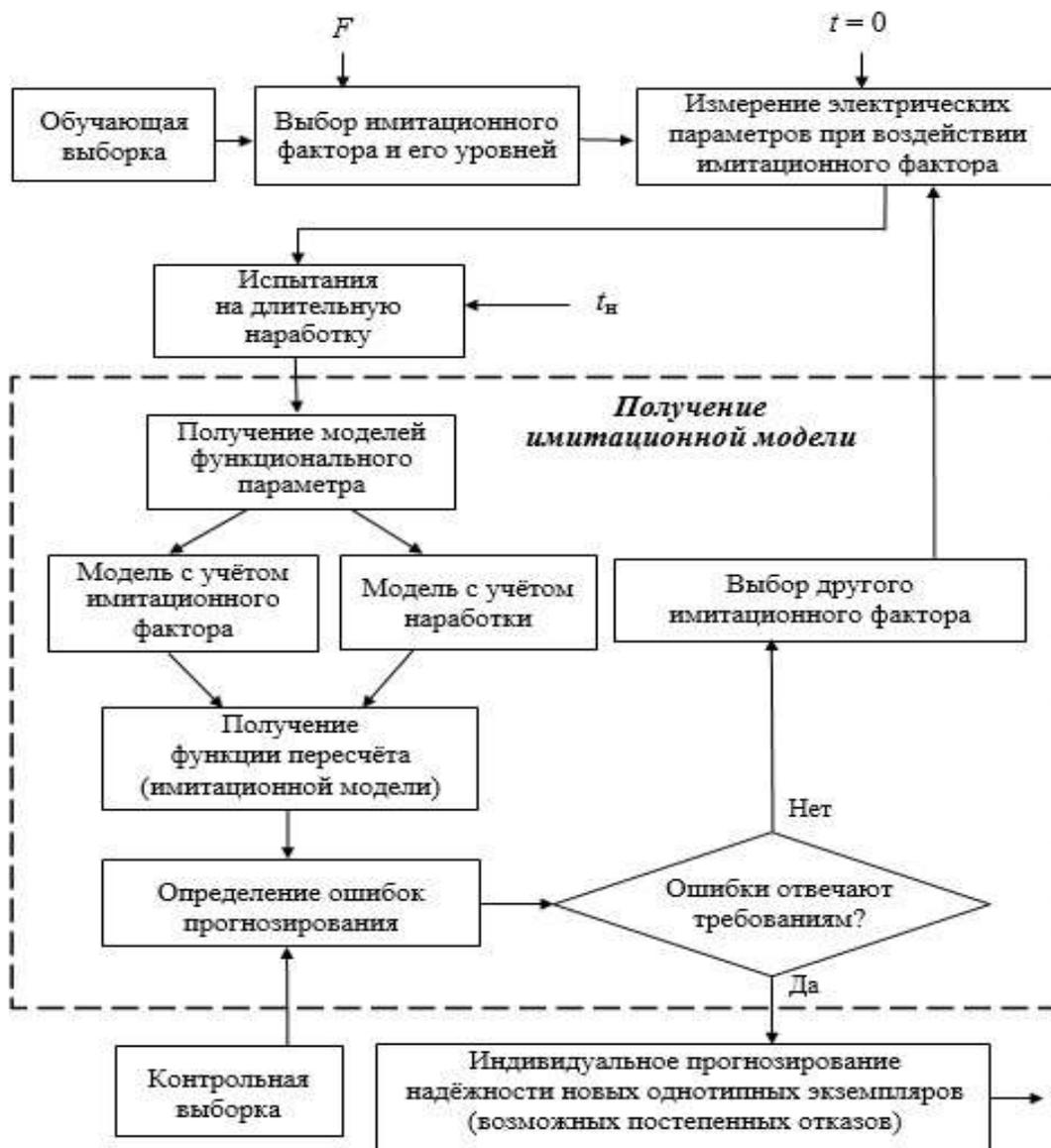


Рисунок 1. Прогнозирование надёжности ППП по постепенным отказам методом имитационных воздействий: F – имитационный фактор; $t = 0$ – начальный момент времени; t_n – интересное время работы (наработка)

Суть обучающего эксперимента состоит в измерении у экземпляров обучающей выборки значений интересующего электрического параметра: вначале в момент времени $t \rightarrow 0$ при воздействии имитационного фактора F , а затем в процессе наработки суммарной продолжительностью, равной значению t_n . Используя результаты этих исследований, имитационную модель получают в виде выражения

$$F_{им} = f(t_n), \quad (1)$$

где: $F_{им}$ – имитационное значение воздействия F , соответствующее заданной наработке t_n ;

f – символ функциональной зависимости;

t_n – заданная наработка (время работы) ППП.

Имитационную модель (1) называют также уравнением связи или функцией пересчёта. Она показывает, как имитационное воздействие F связано с наработкой t . При индивидуальном прогно-

зировании постепенных отказов конкретного экземпляра с использованием полученной имитационной модели (1) поступают следующим образом [3, с. 80]. Для заданного значения наработки t_n расчётом по выражению (1) определяют уровень имитационного фактора $F_{им}$. На ППП (конкретный экземпляр) воздействуют имитационным фактором и при его значении, равном уровню $F_{им}$, выполняют измерение интересующего электрического параметра P . Считают, что экземпляр для заданной наработки t_n будет иметь такое же значение электрического параметра P , как полученное в результате измерения при уровне имитационного фактора, равном $F_{им}$. Результат измерения принимается за прогноз значения электрического параметра P для заданной наработки t_n . Прогнозное значение сравнивается со значением параметра P , приводимым в технической документации на ППП рассматриваемого типа, или со значением, указанным потребителем, использующим ППП рассматриваемого

типа в составе электронной аппаратуры. На основании результата этого сравнения делается вывод о наличии или отсутствии в течение заданной наработки t_n постепенного отказа по электрическому параметру P и, следовательно, соответствии или несоответствию экземпляра требованиям надёжности по постепенным отказам.

Актуальность исследований. Успех в решении задач прогнозирования надёжности биполярных транзисторов (как группы ППП) методом имитационных воздействий во многом зависит от удачности выбора имитационного фактора.

Во многих случаях наиболее важными с точки зрения надёжности биполярных транзисторов при их работе в составе аппаратуры являются такие электрические параметры, как статистический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером ($h_{21Э}$) и напряжение насыщения коллектор – эмиттер ($U_{КЭнас}$). Известно [5, с. 246, 248], что эти параметры заметно изменяются с течением времени при работе транзисторов в электронной аппаратуре, т.е. при работе параметры транзистора деградируют. Кроме того, эти же параметры сильно зависят от температуры. Причём температурные изменения параметров имеют обратимый характер при кратковременном воздействии температуры определённого диапазона и значений. При снятии температурного воздействия электрические параметры транзистора принимают свои первоначальные значения. Поэтому в качестве имитационного фактора есть основания выбрать температуру, в условиях которой находится транзистор. Тогда контроль надёжности транзистора по постепенным отказам может быть выполнен путём измерения параметра $h_{21Э}$ (или $U_{КЭнас}$) в условиях той имитационной температуры $T_{им}$, значение которой соответствует заданному времени работы (наработке t_n) транзистора в аппаратуре.

При имитационном воздействии с использованием в качестве имитационного фактора F температуры T приходится проводить кратковременное охлаждение или нагрев транзистора (конкретного экземпляра) до температуры $T_{им}$, определяемой по имитационной модели вида (1). Очевидным недостатком температуры является наличие затрат времени на установление температуры (уровня $T_{им}$) и её поддержание при измерении электрического параметра. В зависимости от заданной наработки и типа ППП могут возникать случаи, требующие охлаждения до низкой температуры прогнозируемого транзистора во время измерения его электрического параметра, что обуславливает необходимость иметь специальное оборудование.

Кроме того, как отмечалось в работе [6] для некоторых электрических параметров при использовании температуры в качестве имитационного фактора большому диапазону наработок t_n транзистора может соответствовать достаточно малый перепад имитационной температуры $T_{им}$, что вызывает проблемы с поддержанием её точности и приводит к заметным ошибкам прогнозирования параметра. Поэтому актуальным является вопрос о выборе в качестве имитационного фактора F других воздей-

ствий, устраняющих и уменьшающих проблемы, связанные с использованием температуры.

Использование тока коллектора в качестве имитационного воздействия. Как показали исследования [4, с. 223-232], для биполярных транзисторов перспективным является использование в качестве имитационного фактора тока коллектора. Установлено, что в процессе работы транзистора в определённом электрическом режиме его параметр $U_{КЭнас}$ увеличивается. Этот же параметр заметно зависит и от тока коллектора I_K . Между изменениями параметра $U_{КЭнас}$, вызываемыми временем работы (наработкой), с одной стороны, и изменениями, обусловленными сменой протекающего тока коллектора I_K , с другой стороны, существует статистическая аналогия. Поэтому предоставляется возможность по значению параметра $U_{КЭнас}$ при определённом токе коллектора сделать прогноз этого параметра для заданной наработки и принять решение о надёжности транзистора по постепенным отказам. Для этого необходимо для параметра $U_{КЭнас}$ получить выражение вида (1), позволяющее по заданной наработке транзистора t_n определять имитационный ток коллектора ($F_{им} \rightarrow I_{Ким}$). Измерение параметра $U_{КЭнас}$ при этом токе коллектора даст ответ на вопрос о прогнозном значении этого параметра рассматриваемого экземпляра для заданной наработки t_n .

Отметим, что здесь надо различать понятия рабочий ток коллектора $I_{Краб}$ и имитационный ток коллектора $I_{Ким}$. Рабочий ток коллектора $I_{Краб}$ должен быть принят во внимание при испытании транзисторов на длительную наработку. Имитационный ток $I_{Ким}$ рассчитывается по заранее полученной имитационной модели вида (1) с учётом значения заданной наработки t_n и используется для получения прогноза электрического параметра $U_{КЭнас}$ для этой наработки.

Использование тока коллектора в качестве имитационного фактора упрощает процедуру прогнозирования надёжности биполярных транзисторов методом имитационных воздействий.

Модель электрического параметра транзисторов с учётом тока коллектора. Для исследований были взяты биполярные транзисторы большой мощности типа КТ872А. В качестве электрического параметра, по значению которого принималось решение о соответствии прогнозируемого экземпляра требованию надёжности транзисторов по постепенным отказам, было выбрано напряжение насыщения $U_{КЭнас}$. Для решения задачи прогнозирования значения параметра $U_{КЭнас}$ для заданной наработки t_n необходимо иметь имитационную модель вида (1), в которой в качестве имитационного фактора рассматривается ток коллектора I_K . Как видно из схемы (см. рисунок 1) для получения имитационной модели вида (1), используемой для нахождения значения имитационного тока коллектора I_K необходимо, используя обучающую выборку, получить модель параметра $U_{КЭнас}$ в виде усреднённой математической зависимости его от тока коллектора:

$$U_{KЭнас} = f_1(I_K), \quad (2)$$

где: f_1 – символ функциональной зависимости, вид которой выбирается из условия лучшего описания экспериментальных данных.

Объём обучающей выборки составлял 100 экземпляров. По технической документации на транзисторы выбранного типа максимальный постоянный ток коллектора составляет $I_{Kmax} = 7$ А, поэтому

измерения параметра $U_{KЭнас}$ выполнялись в диапазоне 1...7А при отношении $I_K/I_B = 2$, где I_B – постоянный ток в цепи базы транзистора. В качестве экспериментальных точек тока коллектора были выбраны значения $I_K = 1, 3, 5, 7$ А. После измерения в этих точках у каждого экземпляра обучающей выборки параметра $U_{KЭнас}$ были определены средние значения $U_{KЭнас}$ с учётом всех экземпляров обучающей выборки (таблица 1).

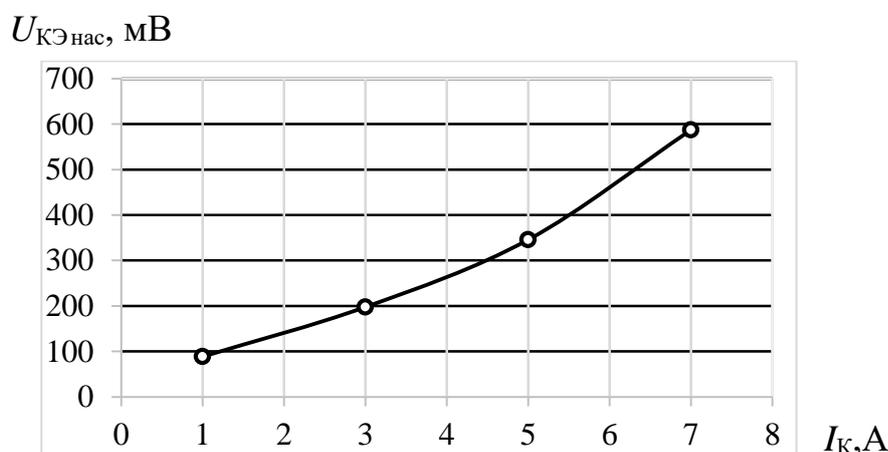
Таблица 1.

Усреднённые значения параметра $U_{KЭнас}$

Ток коллектора I_K , А	1	3	5	7
Напряжение насыщения коллектор – эмиттер $U_{KЭнас}$, мВ	88,9	197,6	345,6	587,1

Экспериментальный график зависимости параметра $U_{KЭнас}$ от тока коллектора I_K показан на рисунке 2. Символом «●» обозначены результаты

измерений, усреднённые по всем экземплярам обучающей выборки.

Рисунок 2. Усреднённая экспериментальная зависимость электрического параметра $U_{KЭнас}$ от тока коллектора при $I_K/I_B = 2$

С помощью инструмента анализа «Регрессия» приложения Microsoft Excel и метода, приведённого в [1, с. 62-65], для математического описания зависимости параметра $U_{KЭнас}$ от тока коллектора I_K получена модель

$$U_{KЭнас} = 21,4 \cdot (I_K)^{1,63} + 67, \text{ мВ}, \quad (3)$$

для которой средняя относительная ошибка прогнозирования $\Delta_{ср}$ значений $U_{KЭнас}$ составляет не более 2-х процентов.

Модель (3) в дальнейшем будет использована для получения функции пересчёта вида (1), в которой в качестве имитационного воздействия принят ток коллектора транзистора ($F_{им} \rightarrow I_{K.им}$).

Заключение. В работе с помощью экспериментальных исследований получена модель для описания изменения среднего значения одного из основных электрических параметров ($U_{KЭнас}$) биполярных транзисторов большой мощности в зависимости от тока коллектора I_K , гипотетически рассматриваемого в качестве имитационного воздействия. Экспериментальное получение этой модели является необходимым этапом для разработки имитационной модели вида (1), позволяющей для заданной наработки транзисторов определять требуемый уровень имитационного тока коллектора $I_{K.им}$. Измеренное у конкретного экземпляра (транзистора) значение параметра $U_{KЭнас}$ при токе коллектора, равном значению $I_{K.им}$, будет прогнозом этого параметра для заданной наработки.

Список литературы:

1. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студентов инж.-техн. спец. вузов / С.М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. European Organization of Quality Control Glassary. – Bern: EOQC, 1988. – 24 p.

3. Боровиков С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники : монография / С.М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.
4. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники / С.М. Боровиков [и др.]; под ред. С.М. Боровикова; УО «БГУИР». – Минск : МГВРК, 2010. – 308 с.
5. Физические основы надёжности интегральных схем / В.Ф. Сыноров, Р.П. Пивоварова, Б.К. Петров, Т.В. Долматова; под ред. Ю.Г. Миллера. – М. : Сов. радио, 1976.– 320 с.
6. Калита, Е.В. Выбор имитационных факторов для моделирования постепенных отказов биполярных транзисторов большой мощности / Калита Е.В., Бересневич А.И., Боровиков С.М. // Современные средства связи : материалы XXVI Международной научно-технической конференции, Минск, 21–22 октября 2021 г. / Белорусская государственная академия связи. – Минск, 2021. – С. 247-248.