



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-80-88>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.33–027.45

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ИМИТАЦИОННОГО ФАКТОРА

БОРОВИКОВ С.М., ШНЕЙДЕРОВ Е.Н., БЕРЕСНЕВИЧ А.И., КАЗЮЧИЦ В.О.

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

Поступила в редакцию 6 июля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Индивидуальное прогнозирование надежности полупроводниковых приборов с учетом постепенных отказов является актуальной задачей, так как позволяет выбрать высоконадежные экземпляры для ответственных электронных устройств длительного функционирования. Применительно к биполярным транзисторам предлагается подход, позволяющий решать задачу прогнозирования путем использования в качестве имитационного воздействия электрическое напряжение, прикладываемое к переходу коллектор – эмиттер. На примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А показано, как можно решить задачу прогнозирования. Для выборки транзисторов этого типа с использованием результатов выполненного обучающего эксперимента получены два уравнения для описания рассматриваемого электрического параметра (статического коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером), по значению которого судят об отсутствии или наличии постепенного отказа для конкретного экземпляра. Первое уравнение показывает, как электрический параметр в среднем изменяется в зависимости от прикладываемого к переходу коллектор – эмиттер электрического напряжения. Второе уравнение описывает в среднем деградацию электрического параметра при длительной наработке транзисторов. На основе этих двух уравнений получена имитационная модель надежности биполярных транзисторов рассматриваемого типа в виде функции связи, показывающей, какой уровень имитационного напряжения соответствует заданной наработке. Полученная имитационная модель применительно к транзисторам рассматриваемого типа позволяет выполнять индивидуальное прогнозирование надежности по постепенным отказам однотипных экземпляров, не принимавших участия в обучающем эксперименте. Для этого вначале определяют значение имитационного напряжения, соответствующее заданной наработке. Достигается это путем подстановки в модель заданной наработки. Индивидуальное прогнозирование надежности нового однотипного экземпляра состоит в измерении у этого экземпляра электрического параметра при напряжении на коллекторе транзистора, соответствующем рассчитанному имитационному значению, и сравнении результата измерения с нормой, установленной на электрический параметр.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, надежность по постепенным отказам, имитационное воздействие, индивидуальное прогнозирование надежности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность администрации и работникам Испытательного центра филиала «Завод Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ», при содействии которых были организованы измерения электрических параметров биполярных транзисторов на сертифицированных измерительных установках.

Для цитирования. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Бересневич А.И., Казючиц В.О. Индивидуальное прогнозирование надежности биполярных транзисторов с использованием электрического напряжения в качестве имитационного фактора. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 80-88.

INDIVIDUAL FORECASTING OF RELIABILITY OF BIPOLAR TRANSISTORS BY USING ELECTRICAL VOLTAGE AS A SIMULATION FACTOR

SERGEI M. BOROVIKOV, EVGENI N. SHNEIDEROV, ANDREI I. BERASNEVICH,
VLADISLAV O. KAZIUCHYTS

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

Submitted 6 July 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Individual forecasting of the reliability of semiconductor devices, taking into account gradual failures, is an urgent task, as it allows you to choose highly reliable instances for critical electronic devices of long-term functioning. In relation to bipolar transistors, an approach is proposed that allows us to solve this problem by using the voltage applied to the collector-emitter junction as a simulated effect. Using the example of high-power bipolar transistors of the KT872A type, it is shown how the problem is solved. For the sample of transistors of this type using the results of a training experiment, two equations were obtained to describe the electrical parameter under consideration (a static base current transfer coefficient in a circuit with a common emitter), the value of which judges the absence or presence of a gradual failure for a specific instance. The first equation shows how the electrical parameter changes on average depending on the voltage applied to the collector – emitter junction. The second equation describes the average degradation of the electrical parameter during long-term operating time of transistors. Based on these two equations, a simulation model of the reliability of bipolar transistors of the type in question is obtained in the form of a communication function that shows what level of simulation voltage corresponds to a given operating time. As applied to the transistors of the type under consideration, the obtained simulation model allows us to individually predict reliability by the gradual failures of the same type of samples that did not participate in the training experiment. To do this, first determine the value of the simulation voltage corresponding to a given operating time. This is achieved by substituting a given operating time into the model. The individual forecasting of the reliability of a new one-type instance consists in measuring the electrical parameter of this instance at a voltage on the transistor collector corresponding to the calculated simulation value, and comparing the measurement result with the norm set on the electrical parameter.

Keywords: semiconductor devices, reliability according to gradual failures, simulation effect, individual reliability prediction.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors are grateful to the administration and employees of the Testing Center of the Branch “Transistor Plant” of JSC “INTEGRAL” with whose assistance measurements of the electrical parameters of bipolar transistors were organized on certified measuring equipment.

For citation. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Berasnevich A.I., Kaziuchyts V.O. Individual forecasting of reliability of bipolar transistors by using electrical voltage as a simulation factor. *Doklady BGUIR*. 2020; 18(5): 80-88.

Введение

Одним из способов получения высоконадежной электронной аппаратуры длительного функционирования (аппаратура военной техники, обеспечения спутниковой связи, мониторинга экологической обстановки и др.) является постановка в электронные устройства экземпляров изделий электронной техники, в том числе биполярных транзисторов, требуемого уровня надежности по постепенным отказам. Под постепенным отказом в технической литературе понимают отказ, возникающий в результате постепенного (с течением времени) изменения значений одного или нескольких параметров прибора, в нашем случае биполярного транзистора.

Долю внезапных отказов приборов можно уменьшить путем улучшения технологических процессов при их изготовлении. Постепенные отказы, которые часто являются следствием внутренних необратимых изменений в материалах полупроводниковых приборов с течением времени (старение), в принципе исключить невозможно. Этим обусловлено внимание к постепенным (деградационным) отказам как биполярных транзисторов, так и полупроводниковых приборов в общем [1]. Известно, что такие изменения в материалах полупроводниковых приборов и, следовательно, постепенные отказы изделий с учетом этих изменений можно прогнозировать. При индивидуальном прогнозировании у конкретного экземпляра изделий рассматриваемого типа контролируются (измеряются) какие-то специфические параметры и по полученным их значениям принимается решение о надежности этого же экземпляра [1].

Одним из методов индивидуального прогнозирования надежности биполярных транзисторов является использование имитационных воздействий (факторов). В основе такого метода лежит статистическая аналогия между изменением (дрейфом) электрического параметра транзистора при длительной наработке и изменением этого же электрического параметра, вызываемым имитационным фактором [1, 2].

Актуальность разработки

В качестве первого имитационного воздействия (фактора) традиционно рассматривают температуру. Однако использование температуры как имитационного фактора для прогнозирования электрических параметров полупроводниковых приборов и, следовательно, их надежности по постепенным отказам связано с определенными производственными проблемами.

Одним из основных недостатков температуры является ее инертность, которая снижает производительность процедуры прогнозирования из-за временных затрат на установление и поддержание заданного значения имитационной температуры, воздействующей на полупроводниковое изделие. В ряде случаев может возникнуть необходимость проводить процедуру охлаждения прогнозируемого экземпляра до значения имитационного уровня температуры и поддерживать это значение температуры при измерении электрического параметра. Все это требует использования сложного технического оборудования.

Кроме того, как отмечается в работе [2], для некоторых электрических параметров биполярных транзисторов при использовании температуры в качестве имитационного фактора могут возникнуть случаи, когда большому диапазону наработок транзисторов будет соответствовать достаточно малый перепад имитационной температуры $T_{им}$. Это обстоятельство даже при малом отклонении температуры от номинального значения (в пределах погрешности) может привести к значительным ошибкам прогнозирования [1]. Например, для статического коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$ транзисторов КТ872А экспериментально установлено, что небольшой перепад воздействующей имитационной температуры $T_{им}$ соответствует диапазону наработок от 1000 до 20 000 ч (рис. 1). Из рис. 1 можно убедиться, что ошибка при прогнозировании электрического параметра транзистора может принять неприемлемое значение даже при отклонении поддерживаемой температуры на ± 2 К. Поэтому поиск альтернативных температуре имитационных факторов является актуальным.

В работе [2] было предложено использовать в качестве имитационного воздействия ток коллектора биполярного транзистора. При этом необходимо различать рабочий ток и имитационный ток коллектора. Рабочий ток коллектора – это то значение тока, которое имеет место при работе транзистора в электрической схеме. Имитационный ток используется только для получения применительно к конкретному экземпляру информации о возможном значении его электрического параметра при заданной длительной наработке.

Использование тока коллектора возможно не для всех электрических параметров биполярных транзисторов ввиду того, что имитационное значение тока, полученное по функции пересчета для интересующих наработок t_3 , может превышать предельно допустимое значение тока коллектора, приводимое в технической документации на биполярные

транзисторы рассматриваемого типа [1]. В качестве примера на рис. 2 показана зависимость имитационного тока $I_{K\text{им}}$ от наработки t для статического коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$ биполярных транзисторов КТ872А при рабочем токе коллектора $I_K = 7$ А. Для этого типа транзисторов предельно допустимое значение тока коллектора, указываемое в технической документации (ТУ), $I_{K\text{ТУ}} = 8$ А. Из рис. 2 видно, что при рабочем токе коллектора $I_K = 7$ А имитационное значение тока коллектора $I_{K\text{им}}$ выходит за пределы допустимого значения по ТУ ($I_{K\text{ТУ}} = 8$ А, коэффициент электрической нагрузки по току при $I_K = 7$ А равен 0,875). Поэтому в данном случае при выполнении индивидуального прогнозирования существует риск повреждения биполярных транзисторов.

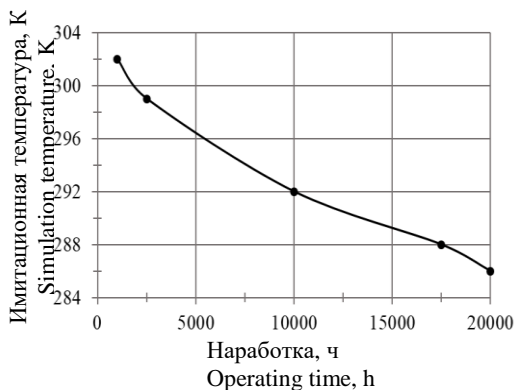


Рис. 1. Функция пересчета наработки t на значение имитационной температуры $T_{\text{им}}$

Fig. 1. The function of converting the operating time t to the value of the simulation temperature T_{sim}

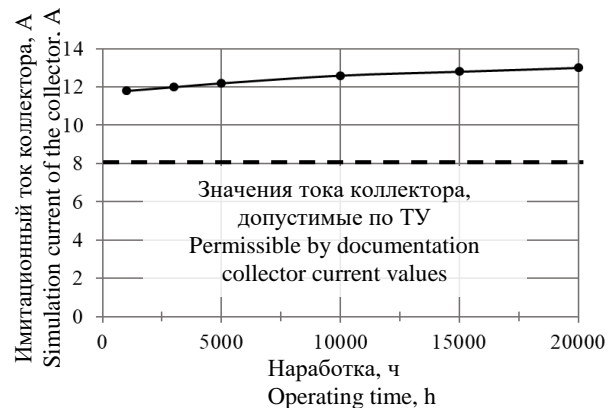


Рис. 2. Функция пересчета наработки t биполярных транзисторов типа КТ872А на значение имитационного тока коллектора $I_{K\text{им}}$ для параметра $h_{21Э}$ при рабочем токе $I_K = 7$ А

Fig. 2. The function of converting the operating time t of bipolar transistors of the КТ872А type to the value of the simulation current of the collector $I_{K\text{им}}$ for parameter $h_{21Э}$ at an operating current of $I_K = 7$ А

Актуальность заключается в поиске других, альтернативных имитационных факторов, которые можно было бы использовать при прогнозировании надежности по постепенным отказам биполярных транзисторов в тех случаях, когда выбор в качестве имитационного фактора тока коллектора является недопустимым.

Теоретический анализ

В работах [1, 3] предлагается использовать напряжение, прикладываемое к $p-n$ -переходам биполярных транзисторов, в качестве альтернативного имитационного фактора. Теоретическим обоснованием возможности его использования как имитационного фактора является существование статистической аналогии между значениями напряжений, прикладываемых к $p-n$ -переходам биполярных транзисторов, и изменениями электрического параметра при длительной наработке. Это подтверждается экспериментальными данными, приводимыми в работах [1, 3], и рис. 3, на котором для электрического параметра $h_{21Э}$ биполярных транзисторов типа КТ872А приводится диаграмма разброса абсолютных изменений (обозначены как $\Delta h_{21Э}$), вызываемых сменой значения напряжения на переходе коллектор – эмиттер транзистора с 2 до 20 В, с одной стороны, и изменений $\Delta h_{21Э}$, обусловленных наработкой транзисторов в течение 15 000 ч, с другой стороны. Коэффициент линейной корреляции R между этими изменениями для исследуемой выборки транзисторов принял значение $R = -0,87$. Поэтому представляется возможным по значению электрического параметра $h_{21Э}$, измеренному при определенном уровне напряжения коллектор – эмиттер $U_{КЭ}$, сделать прогноз электрического параметра и, следовательно, постепенного отказа конкретного экземпляра для заданной наработки t_3 . При этом необходимо различать «имитационное напряжение коллектор – эмиттер» и рабочее напряжение коллектор – эмиттер, обусловленное напряжением питания и электрическим режимом работы транзистора.

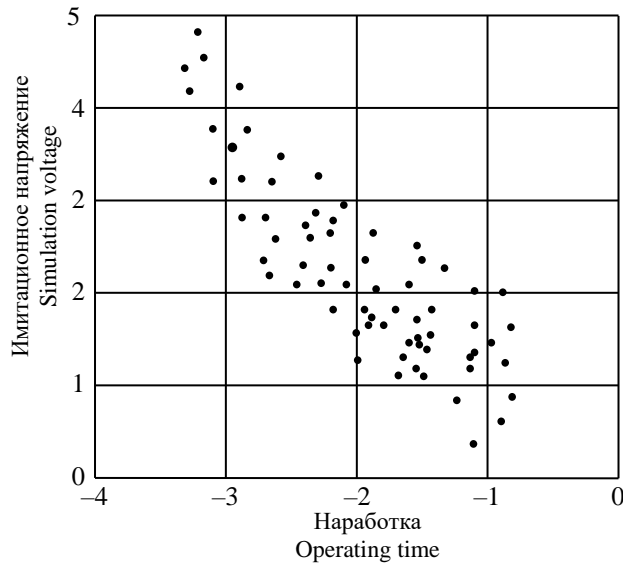


Рис. 3. Диаграмма разброса величин $\Delta h_{21Э}(U_{КЭ})$ и $\Delta h_{21Э}(t)$ биполярных транзисторов типа КТ872А, $R = -0,87$
Fig. 3. Scatter chart of $\Delta h_{21E}(U_{KE})$ and $\Delta h_{21E}(t)$ of КТ872А type bipolar transistors, $R = -0.87$

Для выполнения прогнозирования необходимо для интересующего электрического параметра получить имитационную модель в виде функции пересчета наработки t на значение имитационного напряжения $U_{КЭ\text{ им}}$:

$$U_{КЭ\text{ им}} = f(t), \quad (1)$$

где f – символ функциональной связи.

Модель вида (1) получают один раз, выполняя предварительные исследования электрического параметра (обозначим через P), по значению которого судят о надежности биполярных транзисторов по постепенным отказам. Для получения этой модели используют определенную выборку интересующего типа транзисторов, которую называют обучающей выборкой.

Суть исследований. Вначале у экземпляров обучающей выборки измеряют значения интересующего электрического параметра при воздействии имитационного фактора (напряжения, прикладываемого к переходу коллектор – эмиттер $U_{КЭ}$). Причем значения прикладываемых напряжений $U_{КЭ\text{ им}}$ (как уровней имитационного фактора) должны быть такими, чтобы у транзисторов не происходили необратимые изменения интересующего электрического параметра, то есть параметр должен принимать свое первоначальное значение после снятия имитационного воздействия. После этого обучающую выборку испытывают в течение заданной длительной наработки t_3 , обычно используя ускоренные форсированные испытания. При таких испытаниях происходит деградация рассматриваемого электрического параметра, процессы изменения электрических параметров транзисторов являются необратимыми. Далее, путем обработки полученных экспериментальных данных для экземпляров обучающей выборки получают две математические модели:

$$P = f_1(U_{КЭ}), \quad (2)$$

$$P = f_2(t), \quad (3)$$

где P – среднее значение рассматриваемого электрического параметра, то есть $P = P_{\text{ср}}$, нижний индекс «ср» здесь и далее для простоты записи опущен; f_1, f_2 – символы функциональной зависимости.

Функцию пересчета вида (1) получают, используя построенные модели (2) и (3). Полученная модель (1) будет использоваться для определения имитационного напряжения коллектор – эмиттер $U_{КЭ\text{ им}}$, соответствующего заданной наработке t_3 . Измерение электрического параметра конкретного экземпляра (транзистора) при напряжении коллектор – эмиттер, равном значению $U_{КЭ\text{ им}}$, даст ответ на вопрос о прогнозном значении электрического параметра

для заданной наработки t_3 . Зная норму на электрический параметр, можно принять решение о возможном постепенном отказе конкретного экземпляра для наработки t_3 и при необходимости отбраковать этот экземпляр как не соответствующий требованию надежности.

Экспериментальные исследования

Для экспериментальных исследований использовались кремниевые эпитаксиально-планарные транзисторы большой мощности типа КТ872А, объем выборки 100 экземпляров. Экспериментальные исследования условно включали два этапа. На первом этапе у каждого экземпляра выборки в начальный момент времени снималась зависимость параметра $h_{21Э}$ от прикладываемого напряжения $U_{КЭ}$ при токе коллектора $I_K=0,1$ А. Второй этап заключался в проведении для выборки ускоренных форсированных испытаний на длительную наработку с периодическим (раз в несколько тысяч часов) контролем значений параметра $h_{21Э}$ каждого экземпляра.

Ускорение испытаний достигалось форсированием тепловой и электрической нагрузки [4]. При этом коэффициенты ускорения испытаний по каждой из нагрузок определялись соответственно по моделям Аррениуса и Пека. Итоговый коэффициент ускорения $K_y^{(T, U)}$ испытаний составил 69,5 [5].

Время проведения ускоренных форсированных испытаний было выбрано равным 216 ч, что эквивалентно 15 000 ч наработки транзисторов в обычных условиях.

Экспериментальная установка, используемая для проведения испытаний, представляла собой нагревательную печь с контролируемым и непрерывно поддерживаемым нагревом на уровне +150...200 °С (погрешность не более ± 2 °С). Также в состав установки были включены платы с испытываемыми транзисторами, источник питания (для обеспечения электрической нагрузки), вольтметр, амперметр (для контроля электрической нагрузки), плата предохранителей (для исключения остановки испытаний при выходе из строя какого-либо экземпляра выборки), коммутационный термостойкий жгут и помехоподавляющие конденсаторы.

Результаты и их обсуждение

Используя экспериментальные зависимости электрического параметра $h_{21Э}$ от прикладываемого электрического напряжения $U_{КЭ}$ всех экземпляров обучающей выборки, была получена усредненная зависимость параметра $h_{21Э}$ от прикладываемого напряжения $U_{КЭ}$ (рис. 4). Значения параметра $h_{21Э}$, соответствующие каждой точке значения $U_{КЭ}$, получены усреднением $h_{21Э}$ по всем экземплярам обучающей выборки (100 штук).

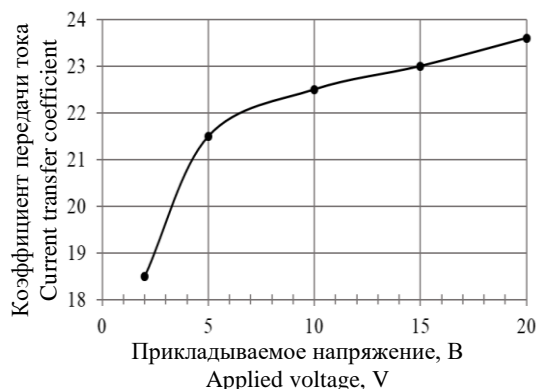


Рис. 4. Экспериментальная зависимость $h_{21Э}$ от прикладываемого напряжения $U_{КЭ}$

Fig. 4. Experimental dependence of h_{21E} on the applied voltage U_{KE}

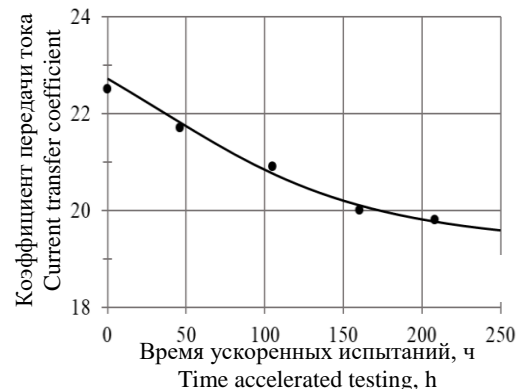


Рис. 5. Экспериментальная зависимость $h_{21Э}$ от времени ускоренных испытаний t_y

Fig. 5. Experimental dependence h_{21E} of accelerated testing time t_y

Для аналитического описания среднего значения $h_{21Э}$ от прикладываемого напряжения $U_{КЭ}$ получено выражение

$$h_{21Э} = 17,9 (U_{КЭ})^{0,097}. \quad (4)$$

На рис. 5 приведена усредненная зависимость параметра $h_{21Э}$ транзисторов типа КТ872А от времени проведения ускоренных форсированных испытаний t_y . Значения параметра $h_{21Э}$ для каждой точки наработки определены также усреднением $h_{21Э}$ по всем экземплярам (100 штук) исследуемой выборки. Вид модели (3) для параметра $h_{21Э}$ [1]:

$$h_{21Э} = \frac{1000}{0,00034t + 43}. \quad (5)$$

Используя модели (4) и (5), получена следующая функция пересчета заданной наработки t на значение имитационного напряжения $U_{КЭ\text{ им}}$:

$$U_{КЭ\text{ им}} = \left(\frac{1000}{0,00609t + 769,7} \right)^{10,31}. \quad (6)$$

Прогнозирование параметра $h_{21Э}$ для однотипных транзисторов новых выборок выполняют, используя функцию пересчета (6). Для этого вначале для интересующей наработки t_3 рассчитывают имитационное напряжение $U_{КЭ\text{ им}}$. В табл. 1 приведены рассчитанные по функции (6) значения $U_{КЭ\text{ им}}$ для некоторых заданных наработок $t = t_3$.

Таблица 1. Значение имитационного напряжения $U_{КЭ\text{ им}}$ (транзисторы типа КТ872А, параметр $h_{21Э}$)
Table 1. The value of the simulation voltage $U_{КЭ\text{ им}}$ (КТ872А transistors, parameter $h_{21Э}$)

Заданная наработка t_3 , ч Given operating time t_g , h	Значение $U_{КЭ\text{ им}}$, В Value $U_{КЭ\text{ им}}$, V	Заданная наработка t_3 , ч Given operating time t_g , h	Значение $U_{КЭ\text{ им}}$, В Value $U_{КЭ\text{ им}}$, V
3000	11,7	15 000	4,68
5000	9,96	20 000	3,27
10000	6,78	30 000	1,65

Для получения ответа на вопрос о значении параметра $h_{21Э}$, которое для заданной наработки t_3 будет иметь взятый для прогнозирования конкретный экземпляр (транзистор), необходимо у этого экземпляра измерить параметр $h_{21Э}$ при напряжении коллектор – эмиттер, равном рассчитанному значению $U_{КЭ\text{ им}}$. Результат измерения следует рассматривать в качестве прогноза параметра $h_{21Э}$ для наработки t_3 . Сравнивая прогнозное значение с нормой для $h_{21Э}$, записанной в документации или указанной потребителем, принимают решение о соответствии или несоответствии экземпляра требованию надежности по постепенным отказам для заданной наработки t_3 .

Анализируя данные табл. 1, можно убедиться, что при погрешности поддержания имитационного напряжения $U_{КЭ\text{ им}}$ в $\pm 0,1$ В ошибка в наработке, для которой получают прогноз параметра $h_{21Э}$, составит не более ± 4 %.

Заключение

С использованием экспериментальных данных установлено, что электрическое напряжение, прикладываемое к переходу коллектор – эмиттер биполярных транзисторов, может использоваться в качестве эффективного имитационного воздействия при решении задач прогнозирования электрических параметров для будущих наработок и, следовательно, принятия решения о соответствии экземпляра требованию надежности по постепенным отказам. Возможность использования в качестве имитационного воздействия (фактора) электрического напряжения, прикладываемого к переходу коллектор – эмиттер, была подтверждена и на примере других типов исследуемых биполярных транзисторов (КТ8271В, КТ8272В).

Список литературы

1. Боровиков С. М. *Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники*. Москва: Новое знание; 2013.
2. Боровиков С.М., Щерба А.И. Прогнозирование работоспособности полупроводниковых приборов методом имитационного моделирования. *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2004;4:37-40.
3. Боровиков С.М., Емельянов А.В., Бересневич А.И. Выбор имитационных факторов при прогнозировании отказов биполярных транзисторов. *Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2006;3:109-112.
4. Robinson L.E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
5. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Плебанович В.И., Бересневич А.И., Бурак И.А. Экспериментальное исследование деградации изделий электронной техники. *Доклады БГУИР*. 2017;2(104):45-52.

References

1. Borovikov S. M. [Statistical forecasting for the rejection of potentially unreliable electronic products]. Moscow: New Knowledge; 2013. (In Russ.)
2. Borovikov S.M., Shcherba A.I. [Prediction of the health of semiconductor devices by the method of simulation]. *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technology in design and production*. 2004;4:37-40. (In Russ.)
3. Borovikov S.M., Emelyanov A.V., Beresnevich A.I. [The choice of simulation factors in predicting failure of bipolar transistors]. *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the NAS of Belarus. Physical-technical series*. 2006;3:109-112. (In Russ.)
4. Robinson L.E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
5. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Plebanovich V.I., Beresnevich A.I., Burak I.A. [An experimental study of the degradation of electronic products]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;2 (104):45-52. (In Russ.)

Вклад авторов

Боровиков С.М. разработал методику проведения исследования, выполнил постановку задач, а также анализ и интерпретацию полученных результатов.

Шнейдеров Е.Н. и Бересневич А.И. в равной степени экспериментально получили зависимости $h_{21E}(t_y)$ и $h_{21E}(U_{KE})$, изображенные на рис. 4 и 5, функцию пересчета (6), а также приняли участие в обсуждении результатов.

Казючиц В.О. организовал экспериментальную установку и выполнил изменения электрических параметров биполярных транзисторов.

Authors contribution

Borovikov S.M. developed the research methodology, formulated the problems, analyzed and interpreted the results obtained.

Shneiderov E.N. and Beresnevich A.I. experimentally obtained the dependences $h_{21E}(t_y)$ and $h_{21E}(U_{KE})$, shown in Fig. 4 and 5, recalculation function (6), and also took part in the discussion of the results.

Kaziuchyts V.O. organized an experimental installation and performed changes in the electrical parameters of bipolar transistors.

Сведения об авторах

Боровиков С.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шнейдеров Е.Н., к.т.н., доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Borovikov S.M., PhD, Associate professor of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shneiderov E.N., PhD, Associate professor of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Бересневич А.И., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Beresnevich A.I., Master of Engineering, Senior Lecturer of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Казючиц В.О., магистр технических наук, ассистент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Kaziuchyts V.O., Master of Engineering, Assistant of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Боровиков Сергей Максимович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Borovikov Sergei Maksimovich