

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

*На правах рукописи*

УДК 621.382.33–027.45

СТАНЮШ  
Иван Павлович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ИЭТ  
МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени  
магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии  
проектирования электронных систем»

Минск 2016

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Боровиков Сергей Максимович,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Казека Александр Анатольевич,**  
кандидат технических наук, доцент. Начальник отдела студенческой науки и магистратуры «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «24» июня 2016 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-20-88, e-mail: kafpiks@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

СОГЛАСОВАНО:

\_\_\_\_\_ С.М. Боровиков

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что для биполярных транзисторов, как разновидности изделий электронной техники (ИЭТ), примерно 80 процентов отказов являются постепенными. Постепенные отказы определяют такое понятие как параметрическая надёжность в виде свойства ИЭТ иметь значение функционального параметра в пределах норм, указанных в ТУ или установленных потребителем, в течение заданной (интересующей) наработки. В отличие от внезапных отказов, постепенные отказы могут быть предсказаны, и, следовательно, могут быть отобраны экземпляры с требуемой параметрической надёжностью. Совершенствуя технологию изготовления ИЭТ, можно существенно уменьшить долю внезапных отказов. Постепенные отказы обусловлены внутренне присущими материалам свойствами и устранить их не удаётся.

Известны научные работы белорусских (Боровиков С.М., Пешес Л.Я. и др.) и российских учёных (Зайцев Н.А., Половко А.М. и др.), в которых рассматривается прогнозирование параметрической надёжности ИЭТ. Среди зарубежных работ заслуживают внимания работы объединённого технического совета JEDEC, статьи таких учёных как Ciarra M., Livingston H.

В исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приводятся результаты, подтверждающие возможность прогнозирования постепенных отказов и, следовательно, параметрической надёжности ИЭТ методом имитационных воздействий. При использовании этого метода о значении параметра, и следовательно, параметрической надёжности экземпляра для заданной наработки судят по его реакции на имитационное воздействие в начальный момент времени (т.е. до использования экземпляра в электронном устройстве). Уровень имитационного воздействия определяют в зависимости от этой наработки, используя функцию пересчёта, показывающую, какой заданной наработке соответствует то или иное значение имитационного фактора. Эту функцию для рассматриваемого типа ИЭТ получают один раз с помощью предварительного исследования выборки ИЭТ, взятой случайным образом из партии ИЭТ. Известны работы, в которых в качестве имитационного фактора используют температуру или же (применительно к биполярным транзисторам) ток коллектора. При этом надо различать рабочий ток коллектора и имитационное значение тока. Использование напряжения коллектор–эмиттер в качестве имитационного фактора практически не исследовано и поэтому представляет интерес. В диссертации показана возможность индивидуального прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов методом имитационных воздействий, используя напряжение коллектор–эмиттер в качестве имитационного фактора.

Выражаю благодарность за оказанную помощь в ходе подготовки диссертационной работы своему научному руководителю, кандидату технических наук, доценту кафедры ПИКС Боровикову Сергею Максимовичу.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Исследования, проведённые многими авторами, показывают возможность индивидуального прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ методом имитационных воздействий. На практике возникает вопрос о выборе имитационного фактора. Использование температуры (как имитационного фактора) приводит к увеличению продолжительности процедуры прогнозирования. Использование для биполярных транзисторов, как разновидности ИЭТ, тока коллектора в качестве имитационного фактора устраняет недостатки температуры, однако в ряде случаев (в зависимости от заданной наработки) значение имитационного тока коллектора может выйти за пределы предельно допустимого уровня, указанного в ТУ, что создаёт опасность повреждения транзистора. В связи с этим актуальными являются исследования по использованию других факторов в качестве имитационного воздействия, в частности напряжения коллектор-эмиттер.

### **Степень разработанности проблемы**

В исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приведены результаты, подтверждающие эффективность прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ методом имитационных воздействий. Известны научные работы белорусских (Боровиков С.М., Пешес Л.Я. и др.) и российских учёных (Зайцев Н.А., Половко А.М. и др.). Среди зарубежных работ заслуживают внимания статьи таких учёных как Ciarra M., Livingston H.

Несмотря на это, среди описанных методов и моделей прогнозирования использование напряжения коллектор-эмиттер в качестве имитационного фактора для биполярных транзисторов исследовано недостаточно.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе модификации метода прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ методом имитационных воздействий.

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является установление закономерностей между изменениями функциональных параметров биполярных транзисторов при действии имитационных факторов (воздействий) в начальный момент времени (до постановки транзисторов в электронные устройства) и дрейфом этих параметров при эксплуатации, и разработка на основе полученных закономерностей метода, позволяющего по реакции функционального параметра на имитационное воздействие в начальный момент времени прогнозировать его значение, и следовательно, соответствие экземпляра требованию параметрической надёжности для заданной наработки.

Для достижения цели в работе необходимо было решить **следующие задачи:**

1. Выбрать и обосновать неразрушающие воздействия (факторы), которые в начальный момент времени могут имитировать изменение функциональных параметров БТ при длительной наработке транзисторов.

2. Установить закономерности между изменениями (дрейфом) основных функциональных параметров БТ, вызываемыми длительной наработкой, с одной стороны, и обратимыми изменениями этих параметров при воздействии на транзисторы имитационного фактора, – с другой.

3. Получить математические модели изменения функциональных параметров БТ при действии имитационного фактора и при длительной наработке.

4. Усовершенствовать метод индивидуального прогнозирования постепенных отказов, и следовательно, параметрической надёжности БТ, основанный на использовании имитационных воздействий.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем»

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

При написании диссертации использованы результаты исследований белорусских и зарубежных специалистов в области прогнозирования надёжности изделий электронной техники методом имитационных воздействий.

Для прогнозирования значений функциональных параметров ИЭТ использовались математические модели, построение которых выполнялось методом наименьших квадратов. Для выявления закономерностей между изменениями функциональных параметров БТ при действии имитационного фактора и изменениями этого функционального параметра при наработке использован корреляционный анализ. Достоверность прогнозирования определялась статистическими методами (расчёт основных числовых характеристик, построение гистограмм распределения для ошибок прогнозирования).

Имитационные математические модели по полученным экспериментальным данным построены с использованием прикладного пакета MathLab, статистическая обработка выполнялась с использованием приложения Microsoft Excel.

**Информационная база** исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, предоставляемой производителями, технических нормативно-правовых актов, сведений из Интернет-ресурсов, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

### **Научная новизна** диссертационной работы:

1. Экспериментально подтверждена статистическая аналогия между

изменениями функционального параметра  $h_{21Э}$  (статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером) биполярных транзисторов при их длительной наработке, с одной стороны, и изменениями этого же параметра при действии на транзисторы в начальный момент времени (т.е. до постановки в аппаратуру) неразрушающего воздействия, имитирующего изменение параметров, с другой стороны.

2. С помощью экспериментальных исследований подтверждена возможность использования напряжения коллектор-эмиттер в качестве имитационного воздействия для прогнозирования постепенных отказов биполярных транзисторов.

3. Индивидуальное прогнозирование постепенных отказов биполярных транзисторов методом имитационных воздействий адаптировано для случая использования напряжения коллектор-эмиттер в качестве имитационного фактора.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Закономерности в виде корреляционных связей между изменениями основных функциональных параметров, обусловленными длительной наработкой БТ, и обратимыми изменениями этих параметров, вызываемыми действием имитационного фактора (напряжения коллектор-эмиттер) в начальный момент времени до постановки транзистора в аппаратуру.

2. Возможность использования параметров электрического режима работы БТ, в частности напряжения коллектор-эмиттер, в качестве имитационного воздействия при прогнозировании постепенных отказов транзисторов.

3. Метод прогнозирования постепенных отказов БТ, основанный на использовании реакции функционального параметра на воздействие имитационного фактора (напряжение коллектор-эмиттер) в начальный момент времени: процедура получения имитационной модели в виде функции пересчёта, показывающей, какой уровень имитационного воздействия соответствует той или иной заданной наработке.

**Теоретическая значимость** состоит в том, что дополнены подходы к прогнозированию надёжности полупроводниковых приборов (ППП) методом имитационных воздействий: обоснован выбор для БТ нового оригинального имитационного воздействия – напряжения коллектор-эмиттер.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что метод имитационных воздействий, используемый для индивидуального прогнозирования постепенных отказов БТ, адаптирован для случая выбора напряжения коллектор-эмиттер в качестве имитационного фактора.

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследования были неоднократно представлены на конференциях: 52-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов

БГУИР, Минск, Беларусь, 2016г; XX Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» Белорусская государственная академия связи, Минск, Беларусь, 2015 г.; XIV Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» Минск, Беларусь, 2016 г.

Отдельные положения диссертации, в частности метод прогнозирования с использованием нового фактора (напряжение коллектор-эмиттер) в качестве имитационного воздействия, использованы при чтении лекций по учебной дисциплине «Надёжность технических систем» специальности 1-39 03 01 Электронные системы безопасности.

### **Публикации**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в семи работах. Общий объём публикаций по теме диссертации составляет 14 страниц.

**Структура и объём работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, решаемыми задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Объём основного текста диссертации – 75 страниц. Работа содержит 10 таблиц, 17 рисунков. Библиографический список включает 83 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы прогнозирования утекания параметров изделий электронной техники (биполярных транзисторов) с течением времени, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы её цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также структура и объём диссертации.

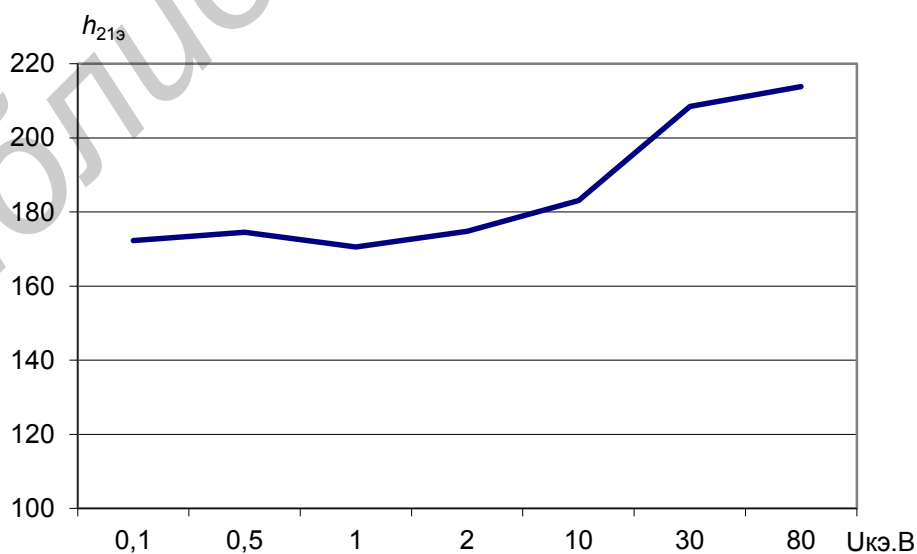
В **первой главе** рассматриваются. На основе обзора литературы и анализа научно-технической информации установлено, что для биполярных транзисторов примерно 80 процентов отказов происходит в виде постепенного ухода функциональных параметров за пределы установленных норм, т.е. в виде постепенных (иначе – параметрических) отказов. В отличие от внезапных отказов, постепенные отказы, как следует из международного документа, могут быть предсказаны и, следовательно, спрогнозированы. Это позволит организовать процесс отбора экземпляров с требуемой параметрической надёжностью на интересующий будущий момент времени.

Предложено для прогнозирования параметрической надёжности ППП использовать метод имитационных воздействий. Показана целесообразность применения этого метода на этапах, когда ППП уже изготовлены: выходной отбраковочный контроль у изготовителя, входной контроль, выполняемый потребителем.

Систематизирован метод имитационных воздействий в применении к прогнозированию (в момент  $t = 0$ ) значений функциональных параметров на заданный будущий момент времени и оценке параметрической надёжности ППП для этого времени.

**Во второй главе.** Дано теоретическое обоснование гипотезе о возможности использования параметров электрического режима работы транзисторов, в частности напряжение коллектор-эмиттер в качестве воздействия (фактора), имитирующего изменение функциональных параметров транзисторов при длительной их наработке. Подчеркнём, что имитационное напряжение коллектор-эмиттер используется в начальный момент времени для получения информации о возможном изменении функциональных параметров транзистора при длительной наработке, его следует отличать от рабочего напряжения коллектор-эмиттер. С помощью экспериментальных исследований на примере БТ типов КТ8271В и КТ8272В были определены закономерности изменения важнейшего функционального параметра ( $h_{21Э}$ ) от значений имитационного фактора, воздействующего на биполярные транзисторы в начальный момент времени ( $t = 0$ ). В качестве возможного имитационного фактора (воздействия) рассматривалось напряжение коллектор-эмиттер.

Для БТ типов КТ8271В и КТ8272В получены математические модели, описывающие в начальный момент времени изменение функционального параметра  $h_{21Э}$  от напряжения коллектор-эмиттер, рассматриваемое в качестве возможного имитационного воздействия.



**Рисунок 1 – Зависимость коэффициента усиления  $h_{21Э}$  БТ КТ8272В от напряжения коллектор-эмиттер  $U_{кэ}$  при  $I_{кэ} = 0,15А$**



Таблица 1– Математические модели функциональных параметров транзисторов

Тип транзистора	Функциональный параметр		Имитационный фактор (начальный момент времени)
	Обозначение	Режим изменения	Напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ , В
КТ8272В	$h_{21Э}$	$U_{КЭ} = 2В;$ $I_{К} = 0,15А$	$h_{21Э} = 168,316U_{КЭ}^{0,054}$
КТ8271В	$h_{21Э}$	$U_{КЭ} = 2В;$ $I_{К} = 0,15А$	$h_{21Э} = 172,674U_{КЭ}^{0,086}$

Из анализа полученных графиков и построенных математических моделей (см. рисунок 1 и таблица 1) установлено, что функциональные параметры, в том числе  $h_{21Э}$ , заметно изменяются от напряжения коллектор-эмиттер  $U_{КЭ}$ . Поэтому фактор  $U_{КЭ}$  может рассматриваться в качестве гипотетически возможного для имитации изменения функциональных параметров транзисторов при длительной наработке.

В третьей главе представлены результаты.

Для биполярных транзисторов (БТ) серийного производства с отработанной технологией были поставлены задачи по исследованию закономерностей дрейфа функциональных параметров при длительной наработке транзисторов, определены принципы этих исследований.

С целью сокращения продолжительности испытаний на длительную наработку (долговечность) принято решение о проведении ускоренных испытаний, выполняемых по типовым методикам.

На основе работ, выполненных многими авторами, установлено, что высокая температура является наиболее оптимальной при ускоренных испытаниях БТ на длительную наработку. Выбран режим и рассчитано время проведения ускоренных испытаний. Проведены испытания на длительную наработку кремниевых БТ.

С использованием результатов ускоренных испытаний на длительную наработку получены деградационные математические модели функциональных параметров  $h_{21Э}$  (зависимости изменения параметров от значений наработки).

Выполнен корреляционный анализ изменений функциональных параметров, определены коэффициенты корреляции между обратимыми изменениями функциональных параметров БТ при действии имитационного неразрушающего воздействия в начальный момент времени, с одной стороны, и необратимыми изменениями параметров при длительной наработке транзисторов – с другой.

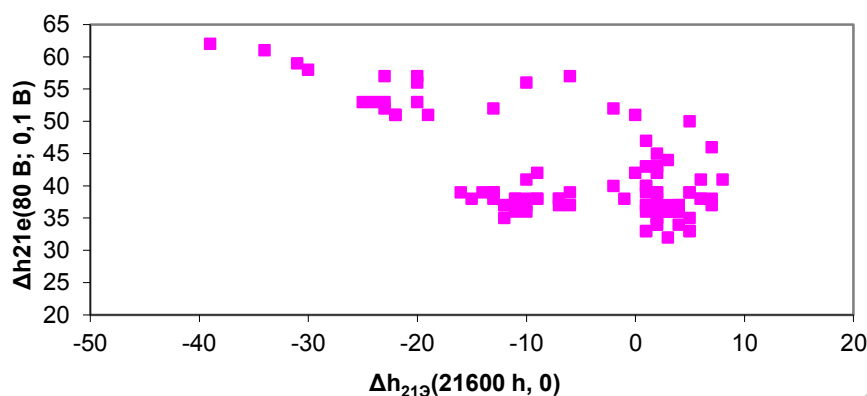


Рисунок 2– Диаграмма разброса величин  $\Delta h_{21\varepsilon} \Big|_{0,1В}^{80В}$  и  $\Delta h_{21\varepsilon} \Big|_{t=0}^{t21600ч}$   $R=0,67$

Установлено, что между этими изменениями имеет место тесная корреляционная связь, для некоторых случаев близкая к функциональной зависимости (оценка коэффициента корреляции достигала значения, близкого к 0,67). Тем самым доказана научная гипотеза о наличии статистической аналогии (тесной корреляционной связи) между изменениями основных функциональных параметров БТ при длительной наработке транзисторов, с одной стороны, и обратимыми изменениями этих параметров при действии имитационного неразрушающего воздействия (в частности напряжения коллектор-эмиттер) в начальный момент времени – с другой.

В четвёртой главе представлены результаты.

На конкретных примерах показано, как получать функцию пересчёта, позволяющую выполнять пересчёт заданной наработки  $t$  на значение имитационного воздействия, вызывающего в момент времени  $t = 0$  примерно такое же изменение функционального параметра  $P$ , как и наработка  $t$  (1). В роли параметра  $P$  рассматривались коэффициент  $h_{21\varepsilon}$  транзисторов типа КТ8272В. В качестве имитационных воздействий использовалось напряжение коллектор-эмиттер.

$$U_{\text{кЭим}} = \exp\{[(\ln(-0,000435 * t + 170,966) - \ln 167,197)/0,0542]\} \quad (1)$$

Применение разработанного метода в отличие от метода экстраполяции параметров не влечёт расходование «в холостую» рабочего ресурса транзистора, позволяет в начальный момент времени определить соответствие прибора требованию параметрической надёжности для заданных будущих наработок и, кроме того, обеспечивает меньшие ошибки прогнозирования для длительных наработок.

Установлено, что для коэффициента  $h_{21\varepsilon}$  использование температуры в качестве имитационного фактора приводит к заметным ошибкам прогнозирования, особенно в области длительных наработок. Объясняется это тем, что большому диапазону изменений наработок соответствует малый интервал изменения имитационной температуры, в этих случаях погрешность установки

и поддержания имитационной температуры существенно скажется на ошибках прогнозирования параметра для длительных наработок. Так, для БТ типа КТ8272В диапазоне наработок от 1000 до 20000 ч соответствует перепад имитационной температуры примерно в 16 градусов. При погрешности поддержания имитационной температуры, не превышающей  $\pm 2$  градуса, ошибка в наработке, для которой будут получать прогнозное значение параметра  $h_{21Э}$ , составит около 1000 ч в нижней части диапазона наработок и более 2500 ч - в его верхней части, что заметно скажется и на значении прогноза параметра для заданной наработки. Поэтому актуальны исследования по поиску других имитационных факторов, позволяющих уменьшить ошибки прогнозирования.

Эффективность использования напряжения коллектор-эмиттер в качестве имитационного фактора подтверждена примером применительно к параметру  $h_{21Э}$  БТ типа КТ8272В. Показано, что ошибка в наработке, для которой определяется прогнозное значение  $h_{21Э}$ , составляет не более 230 ч (не более 5...10% для наработок, которые реально интересуют потребителей) при погрешности поддержания напряжения коллектор-эмиттер, не превышающей  $\pm 0,01$  В.

Рассмотрен вопрос эффективности метода имитационных воздействий применительно к прогнозированию в начальный момент времени функциональных параметров БТ для заданных длительных наработок. Отмечается, что об эффективности можно судить по средней ошибке прогнозирования функционального параметра на заданную будущую наработку. Эту ошибку определяют, используя результаты испытания контрольной выборки. Уточняется выражение для определения средней ошибки прогнозирования. Показано, как при прогнозировании параметрической надёжности методом имитационных воздействий определять эту ошибку и принимать решение о пригодности полученной имитационной модели – функции пересчёта заданной наработки на значение имитационного фактора.

Адаптирована и внедрена методика индивидуального прогнозирования параметрической надёжности БТ, позволяющая по реакции экземпляра (транзистора) на имитационное воздействие (напряжение коллектор-эмиттер) в момент времени  $t = 0$  прогнозировать значение функционального параметра для заданной будущей наработки.

В приложениях приведены сведения, необходимые для пояснения изложенного материала, а так же акт внедрения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На примере биполярных транзисторов КТ8272В и КТ8271В экспериментально установлено наличие сильной корреляции (коэффициент корреляции 0,7 - 0,85) между изменениями (дрейфом) функциональных параметров, вызываемыми длительной наработкой биполярных транзисторов, с одной стороны, и обратимыми изменениями этих параметров, обусловленными действием напряжения коллектор-эмиттер в начальный момент времени, - с другой, что подтвердило гипотезу о наличии статистической аналогии между указанными изменениями. Это обеспечило возможность выполнения прогнозиро-

вания значений функциональных параметров и, следовательно, параметрической надёжности биполярных транзисторов для заданных наработок, используя реакцию транзистора на воздействие напряжения коллектор-эмиттер как имитационного фактора в начальный момент времени.

2. Усовершенствован метод прогнозирования постепенных отказов транзисторов, включающий исследование двух выборок – обучающей и контрольной. Обучающая используется для получения функции пересчёта заданной наработки на значение имитационного воздействия, контрольная – для определения ошибок прогнозирования. На примере параметра  $h_{21Э}$  транзисторов типа КТ8272В разработана процедура нахождения функции пересчёта (имитационной модели), включающая получение математических моделей, показывающих, как функциональный параметр связан с имитационным воздействием и как этот же параметр зависит от наработки. Прогнозную оценку интересующего функционального параметра для заданной наработки применительно к транзистору, не входившему в обучающую или контрольную выборки, получают путём измерения в начальный момент времени этого параметра при значении имитационного воздействия, рассчитанном по функции пересчёта для заданной наработки.

3. На примере транзисторов типа КТ8272В показана эффективность использования напряжения коллектор-эмиттер в качестве имитационного фактора при индивидуальном прогнозировании значений функциональных параметров и параметрической надёжности транзисторов методом имитационных воздействий. Имитационное напряжение коллектор-эмиттер используется в начальный момент времени для получения информации о возможном изменении функциональных параметров транзистора при наработке, его следует отличать от рабочего напряжения коллектор-эмиттер. Установлено, что ошибка прогнозирования параметра  $h_{21Э}$  для наработки 20000 ч при использовании напряжения коллектор-эмиттер в качестве имитационного воздействия в 10 раз меньше, нежели для случая использования температуры, при погрешностях поддержания имитационных воздействий: температуры – не более  $\pm 2$  градуса; напряжения – не более  $\pm 0,01$  В.

4. Усовершенствована методика индивидуального прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов, позволяющая по реакции функционального параметра на имитационное воздействие (напряжение коллектор-эмиттер) в начальный момент времени спрогнозировать значение этого параметра для заданной длительной наработки.

#### **Список опубликованных работ**

##### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

1. Бересневич, А.И. Прогнозирование параметрической надёжности изделия электронной техники по его реакции на имитационное воздействие / И.П. Станюш, [и др]. // Современные средства связи: материалы XX Международной науч.-технич. конф., Минск, Респ. Беларусь, 14-15 октября 2015 г. / УО «Белорусская государственная академия связи». – Минск, 2015. – С. 73-75.

2. Шнейдеров, Е.Н. Ускоренные испытания биполярных транзисторов на длительную наработку / И.П. Станюш, [и др.], // Технические средства защиты информации: материалы XIV Белорусско-российская науч.–техн. конф., Минск, Респ. Беларусь, 25 мая 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск. 2016. – в печати

3. Бересневич, А.И. Использование напряжения коллектор–эмиттер в качестве имитационного фактора при прогнозировании постепенных отказов биполярных транзисторов / И.П. Станюш, А.А. Хатьков, А.И. Бересневич // Технические средства защиты информации: материалы XIV Белорусско-российская науч.–техн. конф., Минск, Респ. Беларусь, 25 мая 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск. 2016. – в печати.

4. Сташевский, Д.А. Использование напряжения коллектор–эмиттер в качестве имитационного фактора при прогнозировании постепенных отказов биполярных транзисторов / И.П. Станюш, [и др.]// Дистанционное обучение-образовательная среда XXI века: Материалы IX международной научно-методической конференции. Минск, Респ. Беларусь, 3–4 декабря 2015 г. / УО «БГУИР». – Минск. 2015. – С.173.

5. Станюш, И.П. Методика ускоренных испытаний полупроводниковых приборов на длительную наработку / И.П. Станюш, А.А. Хатьков, // материалы 52–ой науч. конференция аспирантов, магистрантов и студентов. «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР».– Минск, 2016. – С. 137-139.

6. Станюш, И.П. Ускоренные испытания полупроводниковых приборов на длительную наработку / И.П. Станюш, А.А. Хатьков, // материалы 52–ой науч. конференция аспирантов, магистрантов и студентов. «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР».– Минск, 2016. – С. 135-136.

7. Станюш, И.П. Использование напряжения на р-п-переходе в качестве имитационного фактора для прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов большой мощности / И.П. Станюш, А.А. Хатьков, // материалы 52–ой науч. конференция аспирантов, магистрантов и студентов. «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР».– Минск, 2016.– С. 126-128.

## РЭЗІЮМЭ

Станюш Іван Паўлавіч

**Ключавыя словы:** напружанне калектар-эмітар, біпалярны транзістар, матэматычная мадэль.

**Мэта работы:** усталяванне заканамернасцяў паміж зменамі функцыянальных параметраў біпалярных транзістараў пры дзеянні імітацыйных фактараў у пачатковы момант часу (да пастаноўкі транзістараў у электронныя прылады) і дрэйфам гэтых параметраў пры эксплуатацыі і распрацоўка на аснове атрыманых заканамернасцяў метаду, які дазваляе па рэакцыі функцыянальнага параметру на імітацыйнае ўздзеянне ў пачатковы момант часу прагназаваць яго значэнне, і такім чынам, адпаведнасць асобніка патрабаванню параметрычнай надзейнасці для за-дадзенай напрацоўкі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** на прыкладзе параметру  $h_{21Э}$  транзістараў тыпу КТ8272В распрацавана пра-цедуры атрымання функцыі пераліку (імітацыйнай мадэлі), ўключаю-звяртая пабудова матэматычных мадэляў, якія паказваюць, як функцыі-най параметр звязаны з імітацыйным уздзеяннем і, як гэты ж па-раметр залежыць ад напрацоўкі.

Паказана магчымасць выкарыстання напружання калектар-эмітар ў якасці імітацыйнага фактара пры індывідуальным прагнілі-зированні значэнняў функцыянальных параметраў і параметрычнай надзейнасці біпалярных транзістараў метадам імітацыйных аддам-насці. Імітацыйнае напружанне калектар-эмітар выкарыстоўваецца ў пачатковы момант часу для атрымання інфармацыі аб магчымым з-мяненне функцыянальнага параметру транзістара пры зададзенай наработ-цы, яго варта адрозніваць ад працоўнай напругі калектар-эмітар.

Методыка індывідуальнага прагназавання параметрычнай надзейнасці біпалярных транзістараў метадам імітацыйных аддам-насці адаптаваная для выпадку выкарыстання напружання калектар-эмітар ў якасці імітацыйнага фактара. **Ступень выкарыстання:** вынікі ўкаранёны на кафедры ПКС ў навучальны працэс.

**Вобласць ужывання:** электронная прамысловасць

## РЕЗЮМЕ

**Станюш Иван Павлович**

**Ключевые слова:** напряжение коллектор–эмиттер, биполярный транзистор, математическая модель.

**Цель работы:** установление закономерностей между изменениями функциональных параметров биполярных транзисторов при действии имитационных факторов в начальный момент времени (до постановки транзисторов в электронные устройства) и дрейфом этих параметров при эксплуатации и разработка на основе полученных закономерностей метода, позволяющего по реакции функционального параметра на имитационное воздействие в начальный момент времени прогнозировать его значение, и следовательно, соответствие экземпляра требованию параметрической надёжности для заданной наработки.

**Полученные результаты и их новизна:** на примере параметра  $h_{21Э}$  транзисторов типа КТ8272В разработана процедура получения функции пересчёта (имитационной модели), включающая построение математических моделей, показывающих, как функциональный параметр связан с имитационным воздействием и, как этот же параметр зависит от наработки.

Показана возможность использования напряжения коллектор–эмиттер в качестве имитационного фактора при индивидуальном прогнозировании значений функциональных параметров и параметрической надёжности биполярных транзисторов методом имитационных воздействий. Имитационное напряжение коллектор–эмиттер используется в начальный момент времени для получения информации о возможном изменении функционального параметра транзистора при заданной наработке, его следует отличать от рабочего напряжения коллектор–эмиттер.

Методика индивидуального прогнозирования параметрической надёжности биполярных транзисторов методом имитационных воздействий адаптирована для случая использования напряжения коллектор–эмиттер в качестве имитационного фактора.

**Степень использования:** результаты внедрены на кафедре ПИКС в учебный процесс

**Область применения:** электронная промышленность.

## SUMMARY

**Staniush Ivan Pavlovich**

**Keywords:** collector-emitter voltage, a bipolar transistor, a mathematical model.

**The object of study:** establishing relationships between the changes in functional parameters of bipolar transistors by the action of imitation factors at the initial time (before staging transistors in electronic devices) and the drift of these parameters in the operation and development on the basis of the method of laws allowing for the reaction of the functional parameter simulation effects in the initial time predict its value, and therefore the appropriate instance of the request for the parametric reliability of the-art developments.

**The results and novelty:** the example parameter h21E KT8272V type transistors developed procedure for obtaining the pro-conversion functions (simulation model), turn-schaya construction of mathematical models showing how the functional-functional parameter associated with the influence and imitation as the same pa-parameter depends on the developments.

The possibility of using the collector-emitter voltage as the imitation factor in individual foresight values of functional parameters and parametric reliability bipolar transistors by simulation recompense Business Plan. Simulation collector-emitter voltage is used at the initial time to obtain information about possible because Menen functional transistor parameter for a given narabote-ke, it should be distinguished from the work of the collector-emitter voltage.

Methods of predicting individual parametric reliability bipolar transistors by simulation recompense Business Plan adapted to the case of using the collector-emitter voltage as the imitation factor.

**Degree of use:** results are implemented in the Department of PICS in the educational process.

**Sphere of application:** electronic industry.