

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.382.2

ШНЕЙДЕРОВ
Евгений Николаевич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ
ПО МОДЕЛЯМ ДЕГРАДАЦИИ ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника,
приборы на квантовых эффектах

Минск 2018

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

Мухуров Николай Иванович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией микро- и
наносенсорики Государственного научно-
производственного объединения «Оптика,
оптоэлектроника и лазерная техника»

Хижняк Александр Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент, начальник
научно-исследовательской лаборатории
автоматизированных систем управления
вооружений учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация:

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания
холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Защита состоится 6 декабря 2018 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375 17 2938989.

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

Автореферат разослан 05 ноября 2018 г.

Учёный секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.15.03,
кандидат технических наук, доцент

И.В.Дайняк

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Постепенные отказы полупроводниковых приборов (ППП), которые нередко называют деградационными отказами, определяют понятие «надёжность», т. е. способность ППП сохранять уровень функционального параметра $y(t)$ в пределах норм (от y_{\min} до y_{\max}) в течение заданной наработки t при выбранных режимах и условиях работы. В качестве количественной меры надёжности рассматривается вероятность выполнения в течение наработки t_3 условия $y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}$.

Путём совершенствования технологии изготовления ППП процент возникновения внезапных отказов можно существенно уменьшить. Постепенные отказы, отражающие внутренне присущие материалам ППП свойства, в частности старение, в принципе исключить невозможно. Этим вызван интерес специалистов к постепенным (деградационным) отказам ППП.

Известны подходы, позволяющие в начальный момент времени, до установки готовых ППП в аппаратуру, прогнозировать их надёжность в виде определения вероятности того, что функциональный параметр любого экземпляра выборки однотипных ППП в течение заданной наработки будет находиться в пределах указанных норм. Значительный вклад в развитие методов прогнозирования внесли советские учёные Б. С. Сотсков, А. В. Чуев, Я. Б. Шор, Д. В. Голинкевич, А. М. Широков. С экономической точки зрения решение таких задач прогнозирования актуально для полупроводниковых приборов большой мощности ($P_{\max} \geq 100$ Вт), таких как кремниевые эпитаксиально-планарные биполярные транзисторы, составные транзисторы Дарлингтона, полевые транзисторы с изолированным затвором и др. Указанные ППП широко применяются в аппаратуре длительного функционирования (преобразователи, устройства управления, источники питания и др.).

Для прогнозирования надёжности по постепенным отказам выборки ППП необходимо располагать математической моделью деградации функционального параметра (электрического параметра, по значению которого судят о наличии или отсутствии постепенного отказа). Эта модель должна быть получена с учётом закономерностей процесса деградации этого параметра для выборки однотипных ППП. Решение задач прогнозирования надёжности указанных групп ППП сдерживается отсутствием рекомендаций по выбору и получению моделей деградации функциональных параметров при наработке ППП, в том числе длительной, превышающей наработку, указываемую в технических условиях (далее – ТУ), которая обычно составляет 15...25 тыс. часов. Это не позволяет в условиях производства прогнозировать надёжность применительно к выборкам однотипных ППП и выделять из готовой продукции выборки ППП с известной (по результатам прогнозирования) вероятностью нахождения функционального параметра в пределах норм в течение установленной наработки. В формировании таких выборок (партий) заинтересованы изготовители электронной аппаратуры. Поэтому тема диссертационной работы является актуальной и представляет научный и практический интерес.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» № 472-О от 30.12.2011 и соответствует пункту «б. Электроника и фотоника» Приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утверждённых Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12.03.2015, а также пункту «Технологии электронного приборостроения, микроэлектроника, радиоэлектроника, СВЧ-электроника, электротехника» раздела «3. Промышленные и строительные технологии и производство» Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы, утверждённых Указом Президента Республики Беларусь № 166 от 22.04.2015.

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем в рамках следующих НИР: ГБ НИР № 11-2029 «Разработка программного комплекса автоматизированной оценки надёжности электронных устройств и систем» (2011–2015 гг., № гос. рег. 20121425); ГБЦ НИР № 13-3016 «Прогнозирование параметрической надёжности изделий электронной техники по физико-статистическим моделям деградации параметров» по гранту Министерства образования Республики Беларусь для аспирантов от 28.12.2012 (2013 г., № гос. рег. 20131238); Договор № ОП 2-08 / 08-1202Б БГУИР с Министерством промышленности Республики Беларусь «Система автоматизированного расчёта и оптимизации надёжности электронных устройств» (2008–2012 гг., № гос. рег. 20090344); Договор о научно-техническом сотрудничестве № 13-4019 от 28.12.2013 (с Дополнительными соглашениями №1, №2 и №3) между БГУИР и ОАО «ИНТЕГРАЛ» по получению и использованию моделей деградации функциональных параметров изделий электронной техники при групповом прогнозировании параметрической надёжности (2013–2016 гг.).

Цель и задачи исследования

Цель работы – установление закономерностей деградации функциональных параметров полупроводниковых приборов при их длительной работе и получение моделей для описания деградации, позволяющих с большей достоверностью (в отличие от традиционного подхода) решать задачи прогнозирования надёжности по постепенным отказам выборок однотипных полупроводниковых приборов.

Задачи исследования для достижения цели:

1. Систематизация методов прогнозирования надёжности радиоэлектронных элементов по постепенным (деградационным) отказам и анализ моделей, используемых для описания и прогнозирования деградации функциональных параметров ППП для заданных наработок.

2. Экспериментальные исследования деградации функциональных параметров выборок однотипных ППП посредством проведения ускоренных испытаний, соот-

ветствующих длительной наработке (времени работы) в нормальном режиме с последующей обработкой полученных данных для установления статистических закономерностей деградации параметров для следующих групп ППП: биполярные и полевые транзисторы большой мощности, составные транзисторы Дарлингтона большой мощности ($P_{\max} = 100$ Вт), интегральные стабилизаторы напряжения ($P_{\max} = 15$ Вт).

3. Выбор вида модели, используемой для описания деградации функционального параметра выборки однотипных ППП, и разработка алгоритма получения коэффициентов модели деградации, используемой для прогнозирования надёжности конкретной выборки ППП с учётом статистической закономерности деградации параметра, заданной наработкой и статистических характеристик параметра этой (прогнозируемой) выборки.

4. Разработка и апробирование для промышленности методики прогнозирования надёжности партий однотипных ППП большой мощности для заданной наработки, используя модель деградации функционального параметра.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

- установлено наличие тесной линейной корреляции (по шкале Чеддока – модуль коэффициента корреляции $0,9 \dots 0,99$) между значениями функционального параметра выборки однотипных ППП в начальный момент времени и значениями этого же параметра при длительной наработке (в других временных точках), что обуславливает возможность в начальный момент времени по модели деградации функционального параметра прогнозировать надёжность выборок ППП по постепенным отказам;

- установлено, что с увеличением наработки закон распределения функциональных параметров выборки однотипных ППП видоизменяется (изменение коэффициентов асимметрии и эксцесса до $19,7\%$ на 1000 ч наработки), что указывает на ограниченность традиционной гипотезы (нормальный закон распределения параметра) при прогнозировании надёжности выборок ППП по постепенным отказам для длительных наработок;

- впервые предложена модель на основе условного распределения Вейбулла-Гнеденко, описывающая деградацию функционального параметра выборки ППП, учитывающая заданную наработку и позволяющая в начальный момент времени обеспечить в среднем в $1,5 \dots 4$ раза большую достоверность прогнозирования надёжности выборок ППП по постепенным отказам;

- установлены зависимости коэффициентов предложенной модели деградации от начального распределения функционального параметра конкретной выборки ППП и изменения этого распределения при наработке, позволяющая уменьшить ошибку в оценке вероятности, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа, в среднем с 24 до 6% .

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерность деградации функциональных параметров транзисторов большой мощности (биполярных, полевых транзисторов и составных транзисторов Дарлингтона, $P_{\max} = 100$ Вт), интегральных стабилизаторов напряжения ($P_{\max} = 15$ Вт),

установленная экспериментально и проявляющаяся в наличии линейной корреляционной зависимости (модуль коэффициента корреляции 0,89...0,99) между значениями функциональных параметров в начальный момент времени и их значениями, соответствующими наработкам в диапазоне от 8000 до 36 000 ч, что является теоретической предпосылкой прогнозирования в начальный момент времени надёжности по постепенным отказам выборок однотипных ППП для заданных наработок.

2. Закономерность изменения формы плотностей распределения функциональных параметров выборки однотипных мощных ППП в процессе их работы относительно распределений этих параметров в начальный момент времени (экспериментально полученные изменения значений коэффициентов асимметрии и эксцесса, приходящиеся на 1000 ч, при наработках 8000...36 000 ч в зависимости от функционального параметра: для биполярных транзисторов КТ872А от 0,48 до 6,94 %, для составных транзисторов Дарлингтона КТ8225А от 4,76 до 18,9 %, для полевых транзисторов КП723Г от 1,12 до 19,7 %), что обусловило необходимость поиска закона распределения, реагирующего на эти изменения и обеспечивающего большую достоверность прогнозирования в сравнении с традиционным подходом (гипотезой о нормальном распределении параметра).

3. Модель деградации функционального параметра выборки ППП на основе условного распределения Вейбулла-Гнеденко, коэффициенты которой учитывают изменение формы плотности распределения этого параметра и заданную наработку, что позволяет по сравнению с традиционно используемым нормальным законом распределения для наработок 8000...36 000 ч уменьшить в 1,5...4 раза ошибки в оценке вероятности, с которой гарантируется отсутствие постепенных отказов для прогнозируемой выборки ППП.

4. Методика прогнозирования надёжности выборок однотипных ППП большой мощности, включающая планирование и проведение испытаний, получение уравнений коэффициентов модели деградации функционального параметра, определение математического выражения модели деградации для прогнозной выборки на основе выбранного закона распределения, оценку достоверности прогноза и получение по модели деградации уровня надёжности прогнозной выборки ППП для заданной наработки; использование методики позволило в сравнении с традиционным подходом (гипотезой о нормальном распределении параметра) уменьшить среднюю ошибку прогнозирования надёжности применительно к биполярным транзисторам КТ872А с 24,9 до 5,6 % (параметр $U_{КЭнас}$), применительно к составным транзисторам Дарлингтона КТ8225А – с 20,1 до 5,8 % (параметр $h_{21Э}$), применительно к интегральным стабилизаторам напряжения КР1180ЕН12В – с 24,64 до 7,64 % (параметр $U_{вых}$).

Личный вклад соискателя учёной степени

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в непосредственном участии автора в следующем: формулировке основной гипотезы, измерении функциональных параметров ППП, подготовке и проведении необходимых экспериментов, статистической обработке результатов экспериментов и их обобщении, формулировке выводов. Полученные при выполнении диссертационной работы данные обсуждались с А. В. Шалаком, А. И. Бересневичем,

А. В. Емельяновым, В. И. Плебановичем, И. А. Бурак. На все совместно опубликованные с соавторами работы приведены ссылки. Ускоренные испытания ППП на длительную наработку выполнялись совместно с аспиранткой И. А. Бурак, соискателем А. И. Бересневичем и магистрантом А.А.Хатьковым при консультации В. И. Плебановича и научного руководителя С. М. Боровикова.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на XIX, XX и XXI Международных научно-технических конференциях (НТК) «Современные средства связи» (Минск, 2014–2016 гг.); 9-й, 10-й и 11-й Международных молодёжных НТК «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, 2013–2015 гг.); IX Международной НТК «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» (Минск, 2015 г.); Международной НТК, приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 2014 г.); IX, XI, XII и XIII Белорусско-российских НТК «Технические средства защиты информации» (Минск, 2011–2015 гг.).

Результаты диссертационной работы внедрены в производство в Испытательном Центре Филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ», и позволяют выделять из готовой продукции выборки однотипных ППП с известной (по результатам прогнозирования) вероятностью нахождения функционального параметра в пределах норм ТУ в течение нормированной наработки и поставлять эти выборки заинтересованным заказчикам по специальным ценам с получением экономического эффекта.

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем, а также в учебный процесс University of Žilina в Словацкой Республике (акты приведены в приложении к диссертационной работе).

Опубликование результатов диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 23 работах. В их числе: глава в монографии, 6 статей в рецензируемых научных журналах, включённых в «Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований», 6 статей в сборниках материалов научных конференций, 10 тезисов докладов на научных конференциях. Общий объём публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 «Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь», составляет 2,7 авторских листа.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав, заключения, списка литературы и восьми приложений. Объём диссертации составляет 151 страницу, из них 98 страниц основного текста, 37 рисунков на 14 страницах, 36 таблиц на 15 страницах, 8 приложений на 53 страницах. Список использованных источников включает 154 наименования на 13 страницах, из них 23 наименования собственных публикаций соискателя учёной степени на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится обоснование актуальности выбранной темы, необходимости проведения исследований по получению моделей деградации функциональных параметров ППП большой мощности и их использованию в задачах прогнозирования надёжности приборов, указывается место диссертации среди исследований в области прогнозирования надёжности ППП.

В **общей характеристике работы** сформулированы её цель и задачи, показана связь с научными проектами и темами, указана научная новизна полученных результатов, описаны выносимые на защиту положения, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации и внедрении результатов диссертации, их опубликованности, а также о структуре и объёме диссертации.

В **первой главе** представлен анализ научно-технической литературы по теме диссертационной работы, на основе которого систематизированы возможные подходы к прогнозированию постепенных (деградационных) отказов ППП. Среди методов, привлекающих изготовителей электронных приборов и изготовителей аппаратуры, отмечаются следующие: индивидуальное прогнозирование функционального параметра для заданной наработки методом экстраполяции этого параметра; индивидуальное прогнозирование функционального параметра для заданной наработки методом имитационных воздействий; прогнозирование надёжности выборки ППП – групповое прогнозирование в виде определения вероятности того, что для любого экземпляра выборки функциональный параметр будет находиться в пределах норм в течение заданной наработки.

Выполнен анализ работ по групповому прогнозированию надёжности по постепенным отказам выборок однотипных мощных ППП. Установлено, что эффективность (достоверность) такого прогнозирования определяется удачностью полученной модели деградации функционального параметра. Для этого прогнозирования остались нерешёнными некоторые вопросы:

а) отсутствуют рекомендации по выбору вида математических моделей, описывающих деградацию функционального параметра выборки однотипных ППП при их длительной наработке;

б) не исследованы закономерности деградации функциональных параметров ППП отдельных групп, в частности приборов большой мощности ($P_{\max} \geq 100$ Вт);

в) не разработан алгоритм (способ) получения по результатам обучающего эксперимента модели деградации функционального параметра применительно к конкретной (прогнозируемой) выборке однотипных ППП с учётом заданной наработки.

Принимая во внимание нерешённые вопросы, сформулирована цель диссертационной работы и определены решаемые в диссертации задачи для достижения цели, указано их место в прогнозировании надёжности выборок однотипных ППП по модели деградации их функционального параметра.

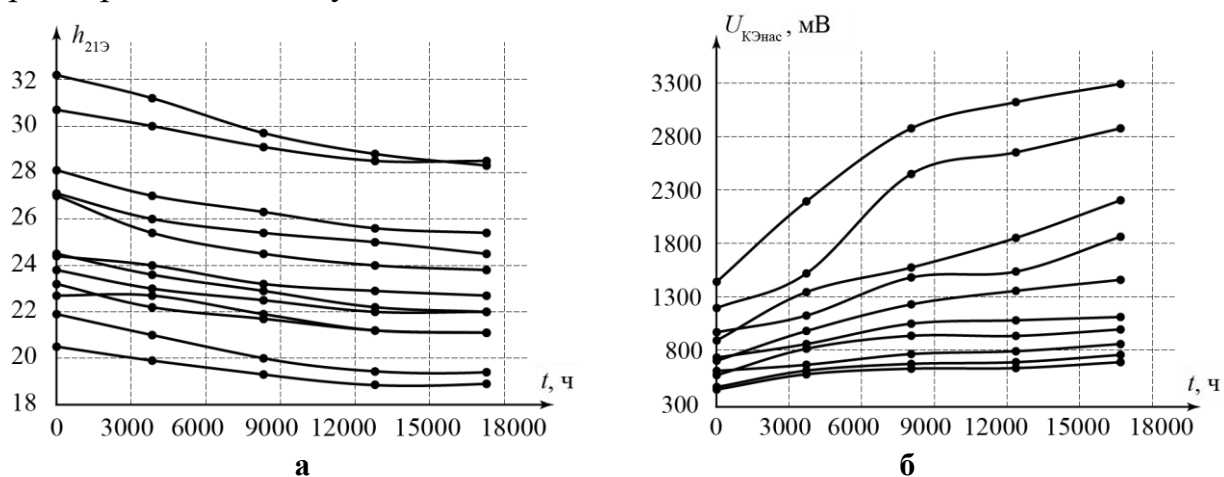
Во **второй главе** описаны экспериментальные исследования ППП, суть которых состояла в проведении для выборок однотипных ППП ускоренных испытаний на длительную наработку с контролем (измерением) в процессе испытаний значений функциональных параметров каждого экземпляра выборки.

Для испытаний были выбраны следующие ППП: кремниевые эпитаксиально-планарные транзисторы большой мощности (тип КТ872А), биполярные составные транзисторы Дарлингтона большой мощности с интегральными демпфирующим и ограничительным диодами (тип КТ8225А), кремниевые эпитаксиально-планарные полевые транзисторы большой мощности с изолированным затвором (тип КП723Г), интегральные стабилизаторы напряжения с фиксированным выходным напряжением (тип КР1180ЕН12В). В качестве функциональных для ППП рассматривались параметры, на которые в ТУ указаны критерии годности и которые являются важнейшими для работы электронных устройств, использующих в своём составе эти ППП.

Для проведения ускоренных испытаний использовались известные подходы. Ускорение испытаний достигалось форсированием режимов работы ППП: тепловой и электрической нагрузками. Коэффициенты ускорения испытаний определялись по моделям Аррениуса и Эйринга.

Измерения функциональных параметров ППП проводились на сертифицированных измерительных установках Испытательного Центра Филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющей компании холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Ускоренные испытания позволили получить данные о деградации контролируемых функциональных параметров ППП в зависимости от значения наработки. На рисунке 1 в качестве примера приведены экспериментальные графики деградации параметров $h_{21Э}$ и $U_{КЭнас}$ транзисторов типа КТ872А. Обозначения и пояснения параметров соответствуют ГОСТ 20003-74.



а – функциональный параметр $h_{21Э}$; б – функциональный параметр $U_{КЭнас}$

Рисунок 1. – Графики деградации функциональных параметров приборов КТ872А

На основе анализа экспериментальных данных и их обработки установлено, что скорости деградации функционального параметра каждого отдельно взятого экземпляра различны и неодинаковы для разных интервалов наработок. Но для выборки ППП, рассматриваемой в целом, имеет место наличие (по шкале Чеддока)

весьма тесной или же тесной линейной корреляции между значениями функционального параметра, взятыми для начального момента времени ($t = 0$), с одной стороны, и значениями этого же параметра в различных точках наработки (временных сечениях t_i), с другой. Модуль коэффициента линейной корреляции $|r| = 0,89 \dots 0,99$, что является теоретической предпосылкой для прогнозирования в начальный момент времени и с высокой достоверностью деградации функциональных параметров выборок однотипных ППП для длительных наработок.

В таблице 1 в качестве примера приведены оценки коэффициентов линейной корреляции, полученные для функционального параметра $U_{КЭнас}$ транзисторов типа КТ872А при объёме выборки равной 90 экземплярам.

Таблица 1. – Коэффициенты линейной корреляции между значениями $U_{КЭнас}(t_i)$ в контролируемых точках наработки t_i и значением $U_{КЭнас}$ в начальный момент времени

Наработка t_i , при которой измерялись значение $U_{КЭнас}$, ч	0	8320	12800	17280
Коэффициент корреляции $U_{КЭнас}(t_i)$ со значением $U_{КЭнас}$ в начальный момент времени	1	0,945	0,940	0,919

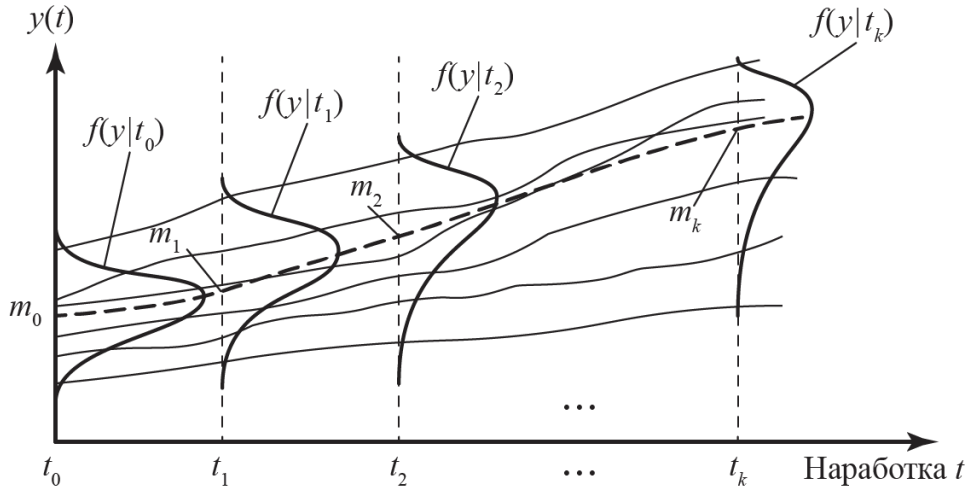
Анализ гистограмм распределения, построенных для функциональных параметров ППП в разных точках наработки (временных сечениях), позволил установить для этих параметров статистические закономерности, учёт которых повысит качество моделей деградации функциональных параметров и снизит ошибки прогнозирования надёжности новых выборок однотипных ППП. Основные установленные закономерности следующие.

1. Для некоторых параметров ППП в начальный момент времени ($t = 0$) гипотеза о нормальном распределении параметра не подтверждается экспериментальными данными (как пример – параметр $U_{КЭнас}$ транзисторов типа КТ872А). Объясняется это, производственными операциями отбора ППП по значениям параметра и отбраковкой путём проведения тренировки приборов.

2. С увеличением наработки форма плотности распределения $f(y|t)$ функционального параметра y изменяется относительно начального момента времени ($t = t_0$), как показано на рисунке 2. Это выражается в изменении значений коэффициентов асимметрии и эксцесса. Изменение этих параметров приходящиеся на 1000 часов работы при наработках 8000...36 000 ч, в зависимости от функционального параметра составляло: для биполярных транзисторов КТ872А от 0,48 до 6,94 %, для составных транзисторов Дарлингтона КТ8225А от 4,76 до 18,9 %, для полевых транзисторов КП723Г от 1,12 до 19,7 %. Причём здесь возможны два основных случая:

– искажается (деформируется) нормальный закон распределения, статистически (при доверительной вероятности 0,95) описывающий параметр в момент времени $t = 0$; при $t \gg 0$ распределение параметра отличается от нормального закона; пример этого случая – параметр $h_{21Э}$ транзисторов КТ872А;

– вид графика плотности распределения параметра для наработок $t \gg 0$ сохраняется (такой же как и при $t = 0$), но изменяются характеристики закона распределения параметра (пример – параметр $U_{КЭнас}$ транзисторов КТ872А).



t_0, t_1, \dots, t_k – точки наработки – временные сечения;
 m_0, m_1, \dots, m_k – средние значения у во временных сечениях (штриховая линия)

Рисунок 2. – Изменение плотности распределения функционального параметра у при работе ППП

В **третьей главе** рассматривается решение проблемных вопросов, касающихся выбора вида модели деградации функционального параметра у и алгоритма получения коэффициентов модели применительно к конкретной (прогнозируемой) выборке однотипных ППП. В качестве модели деградации предложено использовать выражение

$$f(y | t = t_i) = \psi[t_i, m(y | t = 0), \sigma(y | t = 0)] = \psi(t_i, m_0, \sigma_0), \quad (1)$$

где $f(y | t = t_i)$ – условная плотность распределения параметра у для интересующей будущей наработки t_i ;

$m(y | t = 0)$, $\sigma(y | t = 0)$ – среднее значение и среднее квадратическое отклонение (стандартное отклонение) функционального параметра у в начальный момент времени, полученные для выборки ППП, надёжностью которой интересуются; далее эти величины обозначаются соответственно как m_0 и σ_0 ;

ψ – оператор функциональной зависимости; его определяют по результатам предварительных исследований – обучающего эксперимента, проводимого с определённой частью экземпляров (эту часть называют обучающей выборкой), взятых из партии, из которой впоследствии берутся новые выборки для прогнозирования их надёжности по постепенным отказам.

Для рассматриваемого типа ППП модель деградации вида (1) получают один раз по результатам обучающего эксперимента, состоящего в получении данных о деградации функционального параметра экземпляров обучающей выборки. Непосредственно само прогнозирование надёжности следует выполнять для новых выборок, взятых из той же партии, что и обучающая выборка.

С учётом вида гистограмм распределения, построенных для рассматриваемых функциональных параметров ППП по результатам обучающего эксперимента (как пример – рисунок 3), для получения модели деградации вида (1) рассматривалось использование нормального распределения, смещённого (двухпараметрического) экспоненциального распределения и распределения Вейбулла-Гнеденко.

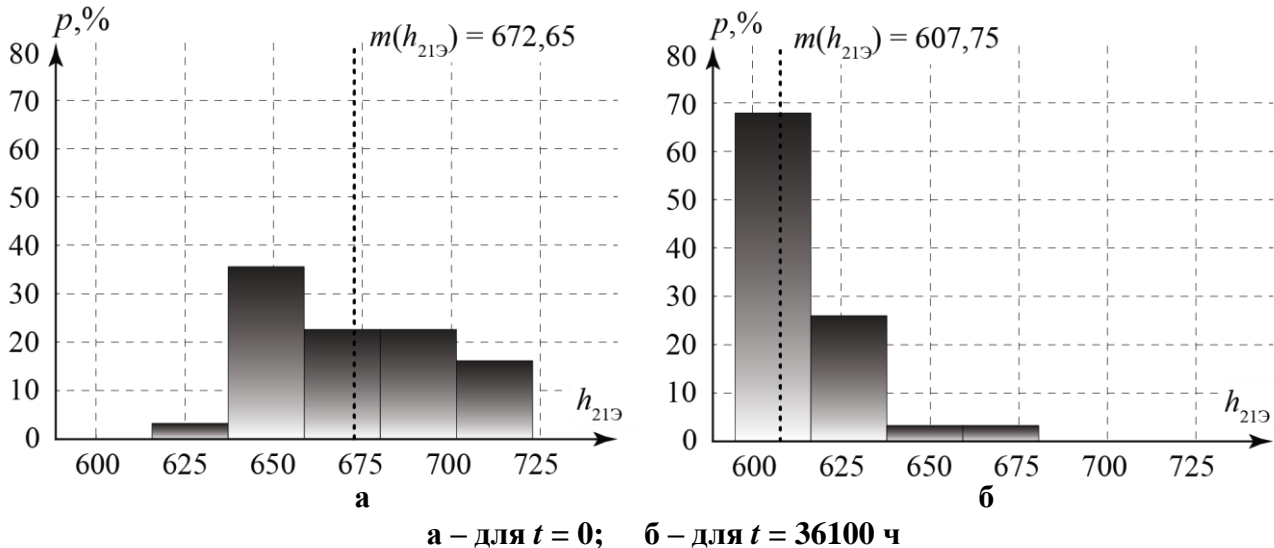


Рисунок 3. – Гистограммы распределения h_{219} (КТ8225А) при различном t

Общий вид моделей деградации функционального параметра и коэффициенты, подлежащие определению для этих моделей по результатам проведения обучающего эксперимента, приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Общий вид моделей деградации функционального параметра

Условный закон распределения, используемый для получения модели	Модель деградации функционального параметра в виде условной плотности распределения	Коэффициенты (параметры) модели
Нормальное распределение	$f(y t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(y t)} \exp\left\{-\frac{[y t - m(y t)]^2}{[\sigma(y t)]^2}\right\}$	$m = m(y t),$ $\sigma = \sigma(y t)$
Двухпараметрическое экспоненциальное распределение	$f(y t) = \frac{1}{\mu} \exp\left[-\frac{1}{\mu}(y t - c)\right], \text{ где } y t \geq c$	$\mu = \mu(y t),$ $c = c(y t)$
Распределение Вейбулла-Гнеденко	$f(y t) = \frac{b}{a} \left(\frac{y t - c}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{y t - c}{a}\right)^b\right], \text{ где } y t > c$	$a = a(t),$ $b = b(t),$ $c = c(t)$
Примечание: $y t$ – текущее значение y для временной точки t .		

Значения получаемых коэффициентов моделей в неявном виде включают физико-химические характеристики деградации функционального параметра y для интересующей наработки t . В соответствии с выражением (1) значение любого (будем

называть j -го) коэффициента модели деградации, указанного в таблице 2, предложено определять в виде функции наработки t и значений m_0 и σ_0 :

$$K_j = \varphi_j(t, m_0, \sigma_0); \quad j = 1, 2, \dots \quad (2)$$

где K_j – обозначение j -го коэффициента модели, приведённой в таблице 2;

φ_j – оператор функциональной зависимости, подлежащий определению для j -го коэффициента.

Для нахождения операторов φ_j выражений (2) использовались результаты обучающего эксперимента. Предложен алгоритм, согласно которому по данным, полученным при выполнении обучающего эксперимента, строится матрица в виде результатов пассивного факторного эксперимента. Для построения матрицы обучающая выборка разбивается на несколько групп. Применительно к получению коэффициентов a , b и c модели деградации, использующей условное распределение Вейбулла-Гнеденко, матрица соответствует таблице 3.

Таблица 3. – Матрица результатов пассивного факторного эксперимента

Диапазон номеров экземпляров обучающей выборки	Номер группы	Величины, рассматриваемые в пассивном эксперименте в качестве факторов			Функция отклика – коэффициенты модели деградации функционального параметра		
		m_0	σ_0	Временная точка t_i	a	b	c
$1 \dots n_1$	1	$m_0^{(1)}$	$\sigma_0^{(1)}$	t_0	$a^{(1)}(t_0)$	$b^{(1)}(t_0)$	$c^{(1)}(t_0)$
$(n_1 + 1) \dots n_2$	2	$m_0^{(2)}$	$\sigma_0^{(2)}$	t_0	$a^{(2)}(t_0)$	$b^{(2)}(t_0)$	$c^{(2)}(t_0)$
...
$(n_{q-1} + 1) \dots n_q$	q	$m_0^{(q)}$	$\sigma_0^{(q)}$	t_0	$a^{(q)}(t_0)$	$b^{(q)}(t_0)$	$c^{(q)}(t_0)$
$1 \dots n_1$	1	$m_0^{(1)}$	$\sigma_0^{(1)}$	t_1	$a^{(1)}(t_1)$	$b^{(1)}(t_1)$	$c^{(1)}(t_1)$
$(n_1 + 1) \dots n_2$	2	$m_0^{(2)}$	$\sigma_0^{(2)}$	t_1	$a^{(2)}(t_1)$	$b^{(2)}(t_1)$	$c^{(2)}(t_1)$
...
$(n_{q-1} + 1) \dots n_q$	q	$m_0^{(q)}$	$\sigma_0^{(q)}$	t_1	$a^{(q)}(t_1)$	$b^{(q)}(t_1)$	$c^{(q)}(t_1)$
...
$1 \dots n_1$	1	$m_0^{(1)}$	$\sigma_0^{(1)}$	t_k	$a^{(1)}(t_k)$	$b^{(1)}(t_k)$	$c^{(1)}(t_k)$
$(n_1 + 1) \dots n_2$	2	$m_0^{(2)}$	$\sigma_0^{(2)}$	t_k	$a^{(2)}(t_k)$	$b^{(2)}(t_k)$	$c^{(2)}(t_k)$
...
$(n_{q-1} + 1) \dots n_q$	q	$m_0^{(q)}$	$\sigma_0^{(q)}$	t_k	$a^{(q)}(t_k)$	$b^{(q)}(t_k)$	$c^{(q)}(t_k)$

В таблице 3 приняты следующие обозначения: n_1, n_2, \dots, n_q – номер экземпляра обучающей выборки, отвечающий последнему элементу соответствующей группы; q – число групп; k – число временных точек (точек наработки); t_i – наработка (временная точка), для которой контролировались значения функционального параметра при его деградации в процессе ускоренных испытаний экземпляров обучающей выборки, $i = 0, 1, \dots, k$.

Первые два столбца таблицы 3 задают номер опыта пассивного эксперимента. Величины m_0, σ_0 и t_i ($i = 0, 1, \dots, k$) рассматриваются в роли факторов, а

интересующие коэффициенты a , b и c – в качестве функций отклика. При использовании условного нормального распределения в качестве функций отклика должны рассматриваться коэффициенты $m(y|t)$ и $\sigma(y|t)$, а в случае двухпараметрического экспоненциального распределения – коэффициенты $\mu(y|t)$ и $c(y|t)$, см. таблицу 2. Верхние индексы всех величин в таблице 3 указывают на номер группы, которой соответствуют величины.

Для практических применений рекомендуется принимать $q_{\min} = 3$, минимальное количество экземпляров в группе n_l (где $l = 1, \dots, q$), согласно математической статистике, желательно иметь $n_{l \min} = 20 \dots 30$. С учётом этого минимальный объём обучающей выборки n_{\min} должен составлять $60 \dots 90$ экземпляров.

Значения функций отклика, включаемые в матрицу в качестве результатов опытов пассивного факторного эксперимента, определялись по принятым в теории вероятностей методам получения по экспериментальным данным параметров законов распределения случайных величин. Уравнения для интересующих коэффициентов K_j модели деградации функционального параметра определялись с помощью инструмента «Multiple Regression Analysis» программного средства «Statistica», используя данные построенной матрицы результатов пассивного факторного эксперимента.

Располагая полученной моделью деградации функционального параметра, количественная характеристика надёжности $P(t_3)$ находилась по принятым в теории вероятностей формулам расчёта вероятностей, используя закон распределения случайных величин. Применительно к модели деградации, получаемой на основе распределения Вейбулла-Гнеденко, формула прогнозирования надёжности для наработки t_i принимает вид

$$P_{\text{пр}}(t_i) = \exp \left\{ - \left[\frac{y_{\min} - c(t_i)}{a(t_i)} \right]^{b(t_i)} \right\} - \exp \left\{ - \left[\frac{y_{\max} - c(t_i)}{a(t_i)} \right]^{b(t_i)} \right\}, \quad (3)$$

где y_{\min} , y_{\max} – нижняя и верхняя границы норм, устанавливаемых на параметр y ;

$a(t_i)$, $b(t_i)$ и $c(t_i)$ – значения коэффициентов a , b и c модели (см. таблицу 3), подсчитанные по уравнениям вида (2) для наработки t_i .

Для проверки пригодности полученной модели деградации функционального параметра использовалась контрольная выборка объёмом 90 экземпляров. Решение о пригодности модели принималось по значению средней ошибки прогнозирования надёжности ($\Delta_{\text{ср}}$) для этой выборки. Использовалась формула

$$\Delta_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{P_{\text{пр}}(t_i) - P_3(t_i)}{P_3(t_i)} \right)^2} \times 100 \% , \quad (4)$$

где k – количество точек наработки t_i (временных точек), для которых находятся прогнозные и экспериментальные значения уровня надёжности;

$P_{пр}(t_i)$ – прогнозируемое значение уровня надёжности экземпляров контрольной выборки, полученное для наработки t_i по формулам вида (3);

$P_3(t_i)$ – экспериментальное значение уровня надёжности экземпляров контрольной выборки, определяемое для наработки t_i по классическому выражению оценки вероятности события по его частоте.

В четвертой главе рассматривается получение уравнений (выражений) для коэффициентов моделей деградации функционального параметра, применение моделей для прогнозирования надёжности ППП контрольной выборки. Выполняется сравнение (по ошибке $\Delta_{ср}$) достоверности прогнозирования, выполняемого по моделям деградации, полученным для функционального параметра на основе разных гипотез о законе его распределения во временных точках t_i .

В качестве примера приведены результаты для транзисторов большой мощности типа КТ872А, функциональный параметр – напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$. По построенной матрице результатов пассивного факторного эксперимента получены выражения для коэффициентов модели деградации $U_{КЭнас}$ для случаев использования нормального распределения, двухпараметрического экспоненциального распределения и распределения Вейбулла-Гнеденко (таблица 4).

Таблица 4. – Выражения для коэффициентов моделей деградации функционального параметра $U_{КЭнас}$ транзисторов типа КТ872А

Условный закон распределения, используемый для получения модели деградации	Выражения для коэффициентов модели деградации, полученные с помощью инструмента «Multiple Regression Analysis» программного средства «Statistica»
Нормальное распределение	$m = 89,26(m_0/\sigma_0) + 0,00815(\sigma_0)^2 + 2,027t^{0,5}$ $\sigma = 0,00567(\sigma_0)^2 + 2,0077t^{0,5}$
Двухпараметрическое экспоненциальное распределение	$\mu = 0,663m_0 - 122,3((m_0/\sigma_0)^{0,5} + 1,663t^{0,5})$ $c = 0,942m_0 - 0,764\sigma_0 + 0,425t^{0,5}$
Распределение Вейбулла-Гнеденко	$a = 0,356(m_0/\sigma_0)^4 + 0,00348(\sigma_0)^2 + 1,892t^{0,5}$ $b = -0,0053m_0 + 0,00964\sigma_0 + 0,766(m_0/\sigma_0) - 0,02245t^{0,2}$ $c = 0,71m_0 - 0,116(m_0/\sigma_0)^4$

Для контрольной выборки объёмом $r = 90$ экземпляров с использованием результатов измерений параметра $U_{КЭнас}$ для начального момента времени ($t = 0$) подсчитано: $m_0 = 605,5$ мВ, $\sigma_0 = 186,8$ мВ. Затем были получены прогнозные значения уровня надёжности $P_{пр}(t_i)$ этой выборки для наработок t_i ($i = 1, \dots, 4$) по трём моделям (см. таблицу 2) с учётом соответствия условию надёжности по параметру $U_{КЭнас}$: $U_{КЭнас} \leq U_{КЭнас\ потр}$, где $U_{КЭнас\ потр}$ – задаваемая потребителем норма на параметр $U_{КЭнас}$ в диапазоне 700...1200 мВ. Результаты ускоренных испытаний на наработку экземпляров контрольной выборки позволили определить оценки вероятностей $P_3(t_i)$, а далее по выражению (4) подсчитать среднюю ошибку прогнозирования надёжности $\Delta_{ср}$ (таблица 5).

Таблица 5. – Значения средней ошибки прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ (%) надёжности по постепенным отказам транзисторов типа КТ872А по параметру $U_{\text{КЭнас}}$

Закон, используемый для получения модели деградации параметра $U_{\text{КЭнас}}$	Средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ (%) при норме на параметр $U_{\text{КЭнас}}$: значению $U_{\text{КЭнас}}^{\text{потр}}$, мВ					
	700	800	900	1000	1100	1200
Нормальное распределение	24,9	16,1	15,2	11,7	13,5	6,1
Двухпараметрическое экспоненциальное распределение	14,8	4,2	3,5	3,8	7,0	3,0
Распределение Вейбулла-Гнеденко	5,6	6,2	3,2	2,4	5,8	2,3

Из таблицы 5 следует, что модель деградации функционального параметра, построенная на основе распределения Вейбулла-Гнеденко, обеспечивает меньшие ошибки прогнозирования уровня надёжности новых выборок однотипных ППП, нежели модель деградации, полученная в предположении нормального распределения или же двухпараметрического экспоненциального закона. Аналогичные результаты имели место и для других функциональных параметров транзисторов типа КТ872А, других исследуемых в работе типов ППП.

В этой главе также излагаются подходы, используемые для разработки методики прогнозирования надёжности по постепенным отказам для выборок ППП, взятых из готовой продукции. Разработанная методика устанавливает порядок проведения обучающего эксперимента применительно к исследуемому типу ППП, определяет последовательность получения по его результатам уравнений для расчёта коэффициентов модели деградации функционального параметра применительно к новой (прогнозируемой) выборке однотипных ППП, описывает процедуру прогнозирования надёжности по рассматриваемому функциональному параметру с помощью полученной модели. Для новой выборки однотипных ППП прогноз надёжности $P_{\text{пр}}(t_i)$ получают в начальный момент времени ($t = 0$) в виде определения вероятности того, что для любого экземпляра этой выборки функциональный параметр для заданной наработки t_i будет находиться в пределах указанных норм. Для нахождения прогнозной вероятности у экземпляров новой выборки в момент времени $t = 0$ измеряют значения функционального параметра и по результатам измерений подсчитывают его среднее значение m_0 и стандартное отклонение σ_0 . Используя m_0 и σ_0 , а также заданное значение наработки t_i , по полученным ранее (по данным обучающего эксперимента) уравнениям вида (2) подсчитывают значения коэффициентов модели деградации, соответствующие этой выборке для наработки t_i . После чего с учётом нормы на параметр определяют прогнозные значения вероятности, с которой гарантируется отсутствие постепенных отказов для ППП этой новой выборки для наработки t_i .

Использование методики позволяет из готовой продукции (партии однотипных ППП) получать выборки приборов с известной (по результатам прогнозирования) надёжностью для выбранной нормированной наработки и поставлять эти выборки ППП заинтересованным потребителям по специальным ценам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Обобщены методы прогнозирования надёжности ППП по постепенным (деградационным) отказам и сделан анализ используемых моделей прогнозирования. В технических источниках не найдено рекомендаций по выбору вида моделей, описывающих деградацию функционального параметра выборки однотипных ППП при их наработке и отсутствует описание алгоритмов (способов) получения модели деградации функционального параметра выборки однотипных ППП с учётом наработки и особенности прогнозируемой выборки [1-А, 9-А, 12-А, 13-А, 15-А, 20-А].

2. Для функциональных параметров ППП большой мощности ($P_{\max} \geq 100$ Вт): кремниевых эпитаксиально-планарных биполярных транзисторов КТ872А, составных транзисторов Дарлингтона КТ8225А, полевых транзисторов с изолированным затвором КП723Г и интегральных стабилизаторов напряжения КР1180ЕН12В ($P_{\max} = 15$ Вт) экспериментально установлены статистические закономерности в виде наличия сильной (по шкале Чеддока) линейной корреляционной зависимости между значениями параметра в начальный момент времени и значениями этого же параметра в точках наработки (временных точках), в том числе длительной, составляющей 36 000 ч и более. Модули коэффициентов корреляции принимали значения в диапазоне 0,89...0,99. Установлено также, что при наработке изменяется форма распределения функционального параметра выборки однотипных ППП (изменяется вид гистограмм распределения, построенных для функционального параметра для разных точек времени работы – наработки) [1-А, 2-А, 7-А, 10-А, 12-А, 13-А, 17-А, 20-А, 23-А].

3. Для описания деградации функционального параметра выборки однотипных ППП предложено использовать модель в виде условного (для заданной наработки) закона его распределения. Для определения коэффициентов этих моделей разработан алгоритм получения по результатам обучающего эксперимента уравнений, в соответствии с которыми значения коэффициентов рассчитываются путём подстановки в них заданной наработки, а также найденных для начального момента времени среднего значения и стандартного отклонения функционального параметра прогнозируемой выборки однотипных ППП. Для получения уравнений предложено, используя данные экспериментальных исследований деградации функционального параметра экземпляров обучающей выборки (обучающий эксперимент) построить матрицу результатов пассивного факторного эксперимента, в котором в качестве факторов рассматриваются наработка и основные числовые характеристики функционального параметра выборки в начальный момент времени, а в качестве функций отклика – коэффициенты модели, для которых по прикладным программам для ПК получают искомые уравнения [2-А, 7-А, 8-А, 11-А, 16-А, 21-А].

4. Теоретически обосновано и экспериментально показано, что модель деградации функционального параметра, построенная на основе распределения Вейбулла-Гнеденко, позволяет обеспечивать меньшие ошибки прогнозирования

надёжности новых выборок ППП по сравнению с моделями деградации, получаемыми на основе других законов распределения параметра. Значение ошибки по сравнению с другими используемыми законами (нормальный, двухпараметрический экспоненциальный) уменьшалось применительно к биполярным транзисторам с 24,9 до 5,6 % (тип – КТ872А, параметр $U_{КЭнас}$), применительно к составным транзисторам Дарлингтона – с 20,1 до 5,8 % (тип – КТ8225А, параметр $h_{21Э}$), применительно к интегральным стабилизаторам напряжения – с 24,64 до 7,64 % (тип – КР1180ЕН12В, параметр $U_{вых}$) [3-А, 5-А, 6-А, 14-А].

5. Разработана и апробирована методика прогнозирования надёжности выборок однотипных ППП по модели деградации функционального параметра, уравнения для расчёта коэффициентов которой получают один раз с помощью экспериментального исследования деградации этого параметра на экземплярах обучающей выборки. Само прогнозирование выполняют для новых выборок однотипных ППП. Для новой выборки прогноз надёжности получают в начальный момент времени в виде определения вероятности того, что для любого экземпляра выборки функциональный параметр для заданной будущей наработки (выбранной нормированной наработки) будет находиться в пределах норм, записанных в ТУ или же в границах, указанных заинтересованным потребителем ППП [4-А, 19-А, 22-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Предлагаемый алгоритм получения (по результатам обучающего эксперимента) уравнений для расчёта коэффициентов модели деградации функционального параметра, соответствующих заданной наработке, пригоден для практического использования независимо от того, какой условный закон распределения параметра будет выбран за основу получения модели его деградации [4-А, 5-А, 12-А, 19-А].

2. Модель деградации функционального параметра, полученная на основе распределения Вейбулла-Гнеденко, обеспечивает меньшие ошибки прогнозирования надёжности новых выборок ППП по сравнению с моделями деградации, полученными на основе других законов распределения. Распределение Вейбулла-Гнеденко рекомендуется использовать во всех случаях независимо от вида гистограмм распределения, построенных для параметров ППП во временных сечениях (точках наработки) [3-А, 5-А, 6-А].

3. Разработанную методику прогнозирования надёжности ППП по моделям деградации их функционального параметра рекомендуется применять с целью получения из готовой продукции выборок однотипных ППП с известной (по результатам прогнозирования) вероятностью отсутствия постепенного (деградационного) отказа для выбранной нормированной наработки [4-А, 7-А, 18-А].

Результаты диссертационной работы внедрены в производство в Испытательном Центре Филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющей компании холдинга «ИНТЕГРАЛ», а также в учебный процесс на кафедре ПИКС БГУИР и в University of Žilina (Словацкая Республика) [Приложения Е, Ж, И].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1-А. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Е. Н. Шнейдеров, А. И. Бересневич ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : МГВРК, 2010. – 308 с.

Статьи в рецензируемых научных журналах

2-А. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники на основе математической модели деградации функционального параметра / С. М. Боровиков, А. В. Шалак, А. И. Бересневич, А. В. Емельянов, Е. Н. Шнейдеров // Доклады БГУИР. – 2008. – № 6(36). – С. 32–39.

3-А. Боровиков, С. М. Использование распределения Вейбулла для прогнозирования параметрической надёжности изделий электронной техники / С. М. Боровиков, Е. Н. Шнейдеров // Доклады БГУИР. – 2011. – № 7(61). – С. 31–37.

4-А. Боровиков, С. М. Методика прогнозирования параметрической надёжности изделий электронной техники по модели деградации функционального параметра / С. М. Боровиков, Е. Н. Шнейдеров // Доклады БГУИР. – 2014. – № 6(84). – С. 5–11.

5-А. Шнейдеров, Е. Н. Выбор модели деградации функционального параметра изделий электронной техники / Е. Н. Шнейдеров, С. М. Боровиков, И. А. Бурак // Известия ГГУ им. Ф. Скорины: естественные науки. – 2014. – № 6(87). – С. 225–231.

6-А. Borovikov, S. Models Based on the Weibull-Gnedenko Distribution for the Description of the Degradation of Functional Parameters of Electronic Devices / S. Borovikov, E. Shneiderov, I. Burak // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 6, № 1. – P. 1–8.

7-А. Экспериментальное исследование деградации изделий электронной техники / С. М. Боровиков, Е. Н. Шнейдеров, В. И. Плебанович, А. И. Бересневич, И. А. Бурак // Доклады БГУИР. – 2017. – № 2(104). – С. 45–52.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

8-А. Borovikov, S. Reliability Prediction of Electronic Devices, Considering the Gradual Failures / S. Borovikov, E. Shneiderov // «GV-CONF 2013»: Proceedings in The 1-st International Global Virtual Conference Workshop, Zilina, 8-12 April 2013 / University of Zilina. – Zilina, 2013. – P. 267–270.

9-А. Систематизация статистического прогнозирования для оценки надёжности изделий электроники / Е. Н. Шнейдеров, И. А. Бурак, С. М. Боровиков, А. В. Будник // Современные средства связи : материалы XIX Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 14–15 октября 2014 г. / Высший гос. колледж связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2014. – С. 118–119.

10-А. Боровиков, С. М. Прогнозирование надёжности выборок ИЭТ по числовым характеристикам функционального параметра в начальный момент времени / С. М. Боровиков, Е. Н. Шнейдеров, Р. П. Гришель // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР : материалы конф. : в 2 ч., Минск, 18–19 марта 2014 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол. : А. А. Кураев [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 94–95.

11-А. Шнейдеров, Е. Н. Ускоренные испытания изделий электронной техники на длительную наработку / Е. Н. Шнейдеров, И. А. Бурак // Современные средства связи : материалы XX Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 14–15 октября 2015 г. / Высший гос. колледж связи ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2015. – С. 115–116.

12-А. Экспериментальное исследование деградации функциональных параметров изделий электронной техники / Е. Н. Шнейдеров, И. А. Бурак, Д. С. Гилимович, С. М. Боровиков // Медэлектроника-2015. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сб. науч. ст. IX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 4–5 декабря 2015 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2015. – С. 193–196.

13-А. Шнейдеров, Е. Н. Результаты ускоренных испытаний изделий электронной техники на длительную наработку / Е. Н. Шнейдеров, А. В. Будник, И. А. Бурак // Современные средства связи : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–21 октября 2016 г. / Белорус. гос. акад. связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2016. – С. 120–121.

Тезисы докладов на научных конференциях

14-А. Шнейдеров, Е. Н. Эффективность выбора закона распределения параметров в задачах прогнозирования надёжности изделий электронной техники на основе их математических моделей деградации / Е. Н. Шнейдеров // Технические средства защиты информации : тез. докл. IX Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28–29 июня 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2011. – С. 60.

15-А. Бунцевич, Р. Л. Прогнозирование эксплуатационной надёжности элементов электронной аппаратуры с использованием справочника RDF 2000 (Франция) / Р. Л. Бунцевич, С. А. Протасевич, Е. Н. Шнейдеров // Технические средства защиты информации : тез. докл. IX Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28–29 июня 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2011. – С. 61.

16-А. Шнейдеров, Е. Н. Получение физико-статистической модели деградации параметра изделий электронной техники / Е. Н. Шнейдеров // Технические средства защиты информации : тез. докл. XI Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 5–6 мая 2013 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2013. – С. 83.

17-А. Шнейдеров Е. Н. Закономерности деградации функциональных параметров изделий электронной техники / Е. Н. Шнейдеров // Технические средства защиты информации: тез. докл. XI Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 5–6 мая 2013 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2013. – С. 86.

18-А. Организация ускоренных испытаний полупроводниковых приборов на длительную наработку / Ю. В. Янцевич, И. А. Бурак, Е. Н. Шнейдеров, С. М. Боровиков, Н. А. Жагора // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2013»: материалы 9-ой междунар. молодёжн. науч.-техн. конф., Севастополь, 22–26 апреля 2013 г. / Севастоп. нац. техн. ун-т; науч. ред. Ю. Б. Гимпилевич. – Севастополь, 2013. – С. 410.

19-А. Шнейдеров, Е. Н. Методика получения физико-статистических моделей деградации параметров изделий электронной техники / Е. Н. Шнейдеров, С. М. Боровиков // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2013»: материалы 9-ой междунар. молодёжн. науч.-техн. конф., Севастополь, 22–26 апреля 2013 г. / Севастоп. нац. техн. ун-т; науч. ред. Ю. Б. Гимпилевич. – Севастополь, 2013. – С. 411.

20-А. Шнейдеров, Е. Н. Прогнозирование постепенных отказов ППП по числовым характеристикам функционального параметра в начальный момент времени / Е. Н. Шнейдеров, С. М. Боровиков // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014»: материалы 10-й междунар. молодежн. науч.-техн. конф., Севастополь, 12–17 мая 2014 г. / Севастоп. нац. техн. ун-т; науч. ред. Ю. Б. Гимпилевич. – Севастополь, 2014. – С. 207.

21-А. Шнейдеров, Е. Н. Получение модели деградации функционального параметра выборки ИЭТ по данным обучающего эксперимента / Е. Н. Шнейдеров // Технические средства защиты информации: тез. докл. XII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28–29 мая 2014 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2014. – С. 52.

22-А. Шнейдеров, Е. Н. Методика прогнозирования надёжности изделий электронной техники по постепенным отказам / Е. Н. Шнейдеров, И. А. Бурак, А. И. Бересневич // Технические средства защиты информации: тез. докл. XIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 4–5 мая 2015 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2015. – С. 62.

23-А. Шнейдеров, Е. Н. Испытания изделий электронной техники на длительную наработку / Е. Н. Шнейдеров, И. А. Бурак, А. И. Бересневич // Технические средства защиты информации: тез. докл. XIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 4–5 мая 2015 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2015. – С. 62.

РЭЗІЮМЭ

Шнэйдзераў Яўгеній Мікалаевіч

Прагназаванне надзейнасці паўправадніковых прыбораў вялікай магутнасці па мадэлям дэградацыі іх функцыянальных параметраў

Ключавыя словы: паўправадніковыя прыборы, паступовыя (дэградацыйныя) адмовы, функцыянальны параметр, мадэль дэградацыі, надзейнасць, прагназаванне.

Мэта работы: устанаўленне заканамернасцяў дэградацыі функцыянальных параметраў паўправадніковых прыбораў пры іх працяглай працы і атрыманне мадэляў для апісання дэградацыі, якія дазваляюць з большай пэўнасцю (чым традыцыйныя падыходы) рэшаць задачы прагназавання надзейнасці па паступовым адмовам выбарак аднатыпных паўправадніковых прыбораў.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: паскораныя фарсіраваныя выпрабаванні ППП на напрацоўку, статыстычныя метады апрацоўкі эксперыментальных дадзеных, імавернасна-статыстычныя метады апісання функцыянальных параметраў выбарак аднатыпных ППП, рэгрэсійны аналіз, устаноўка для правядзення паскораных выпрабаванняў, прамысловыя ўстаноўкі вымярэння параметраў ППП.

Асноўныя вынікі і іх навізна: заканамернасць паміж значэннямі функцыянальнага параметра выбаркі ППП у пачатковы момант часу і яго значэннямі ў кропках напрацоўкі 8000...36 000 гадзін, заканамернасць змянення формы шчыльнасцяў размеркавання функцыянальных параметраў выбаркі аднатыпных магутных ППП ў працэсе іх працы адносна размеркаванняў гэтых параметраў у пачатковы момант часу.

Прапанавана мадэль дэградацыі функцыянальнага параметру выбаркі ППП на аснове ўмоўнага размеркавання Вейбула-Гнядзенкі, якая дазваляе ў параўнанні з нармальным законам размеркавання для напрацовак 8000...36 000 ч паменшыць у 1,5 ... 4 разы памылкі прагназавання надзейнасці гэтай выбаркі.

Распрацавана метадыка прагназавання надзейнасці выбарак аднатыпных ППП вялікай магутнасці, якая выкарыстоўвае прапанаваную мадэль дэградацыі.

Ступень выкарыстання і вобласць прымянення вынікаў: вынікі ўкаранёны ў Выпрабавальным Цэнтры Філіяла «Транзістар» ААТ «ІНТЕГРАЛ», а таксама ў навучальны працэс на кафедры ПКС БДУІР і ў University of Žilina (Славацкая Рэспубліка).

РЕЗЮМЕ

Шнейдеров Евгений Николаевич

Прогнозирование надёжности полупроводниковых приборов большой мощности по моделям деградации их функциональных параметров

Ключевые слова: мощные полупроводниковые приборы, постепенные (деградационные) отказы, функциональный параметр, модель деградации, надёжность, прогнозирование.

Цель работы: установление закономерностей деградации функциональных параметров полупроводниковых приборов при их длительной работе и получение моделей для описания деградации, позволяющих с большей достоверностью (нежели традиционные подходы) решать задачи прогнозирования надёжности по постепенным отказам выборок однотипных полупроводниковых приборов.

Методы исследования и использованная аппаратура: ускоренные форсированные испытания ППП на наработку, статистические методы обработки экспериментальных данных, вероятностно-статистические методы описания функциональных параметров выборок однотипных ППП, регрессионный анализ, установка для проведения испытаний ППП, промышленные установки измерения параметров ППП.

Основные результаты и их новизна: закономерность между значениями функционального параметра выборки ППП в начальный момент времени и его значениями в точках наработки 8000...36 000 ч; закономерность изменения формы плотностей распределения функциональных параметров выборки однотипных мощных ППП в процессе их работы относительно распределений этих параметров в начальный момент времени.

Предложена модель деградации функционального параметра выборки ППП на основе условного распределения Вейбулла-Гнеденко, позволяющая по сравнению с нормальным законом распределения для наработок 8000...36 000 ч уменьшить в 1,5...4 раза ошибки прогнозирования надёжности этой выборки.

Разработана методика прогнозирования надёжности выборок однотипных ППП большой мощности, использующая предложенную модель деградации.

Степень использования и область применения результатов: результаты внедрены в Испытательном Центре Филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ», а также в учебный процесс на кафедре ПИКС БГУИР и в University of Žilina (Словацкая Республика).

SUMMARY

Shneiderov Evgeni

Prediction of high-power semiconductor devices reliability by degradation models of their functional parameters

Keywords: powerful semiconductor devices, gradual (degradative) failures, functional parameter, degradation model, reliability, prediction.

The aim of the work: to establish the regularities of the functional parameters degradation of semiconductor devices during their long work, and to derive the models for degradation describing that allow to solve the problems of reliability predicting by gradual failures of similar semiconductor devices samples with bigger authenticity (than traditional approaches).

The investigation methods and used equipment: accelerated forced tests of semiconductor devices for long-term work, statistical methods for processing experimental data, probabilistic-statistical methods for describing the functional parameters of similar semiconductor devices samples, regression analysis, semiconductor devices testing installation, industrial installations for measuring the parameters of the semiconductor devices.

Main results and their novelty: the regularity between the values of the functional parameter of semiconductor devices sample at the initial time moment and it's values at the points of operating time 8000...36 000 hours, the regularity of changing the form of distribution density of functional parameters of similar high-power semiconductor devices samples during their work comparing with distribution of these parameters at the initial moment of time.

Functional parameter degradation model of semiconductor devices sample is proposed based on conditional distribution of Weibull-Gnedenko, that allow to reduce 1,5...4 times the errors of this sample reliability prediction compared to the normal distribution law for operating time 8000...36 000 hours.

The method using the proposed degradation model has been developed for predicting the reliability of similar high-power semiconductor devices samples.

Extent of use and field of results application: results are implemented in the Testing Center of Brach «Transistor», JSC «INTEGRAL», as well as in the educational process at the department of Information and Computer Systems Design of BSUIR and at the University of Žilina (Slovak Republic).

Научное издание

Шнейдеров Евгений Николаевич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ
ПО МОДЕЛЯМ ДЕГРАДАЦИИ ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс»	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.	Тираж 60 экз.	Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровка, 6.