

Академия наук Украины  
Институт кибернетики имени В. М. Глушкова

На правах рукописи

**ФЕДУХИН Александр Викторович**

УДК 621.382.019.3

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ  
НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ  
И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

05.13.05 — элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев 1994

ДВ 30.013

Работа выполнена в Институте проблем математических машин и систем АН Украины.

Научный руководитель: доктор технических наук  
СТРЕЛЬНИКОВ В. П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор ЗАБАРА С. С.,  
кандидат технических наук  
МИЛЕНИН Г. В.

Ведущая организация: НИИ Микроприборов.

Защита состоится «15» апреля 1994 г. в 14  
часов на заседании специализированного совета Д 016.45.02  
при Институте кибернетики имени В. М. Глушкова АН Укра-  
ины по адресу:

252207 Киев 207, проспект Академика Глушкова, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-техническом архиве института.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00756522 (R)

Автореферат разослан «9» мая 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

Гуменюк-Сычевский В. И.

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Актуальность темы. Создание высокоэффективных средств вычислительной техники и ЭВМ сопровождается ростом требований к их надежности. Обеспечение этих требований является сложной научно-технической проблемой, в которой ведущее место занимают вопросы повышения надежности элементной базы, основу которой составляют изделия электронной техники /ИЭТ/- полупроводниковые приборы /ПП/ и интегральные схемы /ИС/.

Оценка количественных показателей надежности ПП и ИС и подтверждение требований, предъявляемых к ним, связаны со значительными затратами как времени, так и средств. В связи с этим возникает настоятельная потребность в сокращении длительных процедур по оценке надежности ИЭТ. Одним из видов измерения и контроля надежности, отвечающим поставленным требованиям, являются ускоренные и, в частности, форсированные испытания.

Проблеме форсированных испытаний на надежность ПП и ИС посвящено большое число публикаций, в которых были предложены различные методы проведения и обработки результатов форсированных испытаний. Однако широкому их внедрению в практику препятствует ряд нерешенных задач, следствием которых является недостаточная адекватность результатов, полученных в процессе форсированных испытаний с результатами эксплуатации. Это вызвано в первую очередь тем, что до сих пор не разработана инженерная модель надежности ИЭТ, учитывающая одновременное действие в изделии нескольких деградиационных процессов с различными энергиями активации. Игнорирование реально существующей деградиационной картины в случае непараметрических методов или упрощение ее до одного деградиационного процесса в случае параметрических методов приводит к потере доверия к количественным показателям, полученным в результате пересчета от форсированного режима к режиму применения. Поэтому крайне необходима разработка такой модели надежности ИЭТ, которая бы учитывала все многообразие деградиационных процессов, протекающих в изделии и приводящих его в состояние отказа.

Одно из фундаментальных понятий в теории форсированных испытаний, каким является "автомодельность", требует серьезного уточнения. Утверждение о том, что существует некоторый диапазон термической нагрузки, в рамках которого параметр формы функции распределения наработки до отказа является постоянной величиной, есть доста-

точно грубое допущение, оказывающее существенное влияние на адекватность получаемых результатов.

Таким образом, решение проблемы форсированных испытаний сводится к снятию грубых допущений, вызванных отсутствием необходимого математического аппарата и построению такой теоретической модели надежности ИЭТ, которая базировалась бы на исследованиях физики отказов изделий и учитывала их реальную деградационную картину.

Решению этой актуальной задачи и посвящена настоящая диссертация.

Диссертационная работа выполнялась в рамках научно-исследовательской тематики ИПММС АН Украины, "Программы стандартизации в области надежности, прочности, износостойкости, эксплуатации и ремонта техники на 1986-1990 гг." /№ 0027.4501.09.85; шп. 01.03.003, 01.05.003, 01.05.006/, утвержденной ГКНТ СССР и Президиумом АН СССР "Общесоюзной научно-технической программы НАДЕЖНОСТЬ на 1987-1990 гг." /задание П.01.Н6а/, Плана государственной стандартизации Украины на 1992г

Цель работы. Целью настоящей диссертационной работы является разработка методов ускоренной оценки надежности ПП и ИС, повышающих адекватность результатов прогноза количественных показателей надежности ИЭТ.

Для достижения намеченной цели потребовалось решение следующих задач:

1. Теоретическое обоснование подхода к исследованию надежности ПП и ИС, позволяющего связать количественные показатели надежности с физическими процессами деградации, протекающими в изделиях и приводящими их в отказовое состояние.

2. Построение математических моделей надежности /функций распределения наработки до отказа/ изделий на основе физических процессов деградации и подтверждение эффективности разработанных моделей методами статистического моделирования и экспериментом.

3. Разработка расчетно-экспериментальных методов оценки количественных показателей надежности ИЭТ по результатам форсированных испытаний.

4. Разработка методов планирования форсированных испытаний ПП и ИС на безотказность.

Методы исследования. Решение указанных выше задач осуществлялось методами теории случайных процессов, теории надежности, математической статистики и статистического моделирования на ЭВМ.

Научная новизна.

1. Разработаны вероятностно-физические модели надежности ПП и ИС, основанные на использовании более эффективного двухпараметрического диффузионного распределения, параметры которого имеют конкретную физическую интерпретацию.

2. Впервые в теории форсированных испытаний ИЭТ рассматривается наиболее общая постановка задачи, основанная на том, что в изделии одновременно действует несколько деградиционных процессов с различными энергиями активации.

3. Разработана процедура преобразования диаграммы Парето при изменении температуры полупроводниковой пластины.

4. Разработаны расчетно-экспериментальные методы оценки средней скорости деградации ИЭТ по результатам форсированных испытаний.

5. Разработаны методы планирования форсированных испытаний ПП и ИС на безотказность.

Практическая ценность работы. Отмеченные выше научные результаты, полученные в диссертации, имеют конкретную прикладную направленность, связанную с повышением надежности элементной базы СВТ и ЭВМ, имеют важное народнохозяйственное значение. Разработанные методы оценки надежности ИЭТ, приводящие к более точным прогнозным оценкам, позволяют контролировать реально достигнутый уровень надежности элементной базы на стадии ее производства и уже на ранних этапах проектирования СВТ и ЭВМ своевременно принимать необходимые меры по обеспечению заданного уровня надежности.

Разработанные методы исследования надежности приняты Госстандартами СССР и Украины и вошли в межотраслевой руководящий документ РД 50-690-90. "Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным", ДСТУ "Изделия электронной техники. Методы расчета надежности" /закл.ред., 1993г./, ДСТУ "Надежность техники. Расчет показателей надежности. Общие требования" /закл.ред., 1993г./, ДСТУ "Надежность техники. Оценка показателей надежности по результатам испытаний" /закл.ред., 1993г./.

Апробация работы. Основные научные и экспериментальные результаты диссертационной работы докладывались на всесоюзных и республиканских конференциях и семинарах, а именно: Всесоюзном научно-техническом симпозиуме "Надежность и качество в приборостроении и радиоэлектронике" /Ереван, 1986/, Всесоюзной конференции "Конструктивно-технологические методы повышения надежности и их стандарты-

зация" /Тула,1988/, Зональной конференции "Методы оценки и повышения надежности РЗА" /Пенза,1989,1990/, Республиканской научно-технической конференции "Бытовая радиозлектронная аппаратура: управление качеством и надежностью" /Одесса,1990/, Республиканском научно-техническом семинаре "Вероятностно-физические методы исследования надежности машин и аппаратуры" /Киев,1986,1988,1990,1992/, Республиканском семинаре Научного совета АН Украины по проблеме КИБЕРНЕТИКА "Качество, надежность и сертификация технологий и средств вычислительной техники и автоматизации" /Киев,1993/.

Публикация результатов работы. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 1 брошюра, 3 статьи, 9 тезисов докладов на конференциях и семинарах. Результаты диссертации также вошли в межотраслевой руководящий документ Госстандарта СССР и три проекта государственных стандартов Украины.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, иллюстрированных рисунками и таблицами, заключения, списка литературы и двух приложений.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит краткую формулировку проблемы, обосновывает актуальность, раскрывает структуру изложения материала диссертации.

Первая глава посвящена обзору и анализу современного состояния проблемы ускоренной оценки надежности ПП и ИС, обоснованию подхода и постановке задач исследования.

Активизация разработки и производства разнообразных типов ПП в конце 50-х годов потребовала решения задачи экспериментальной оценки их надежности. Но поскольку уже первые образцы полупроводниковых транзисторов и диодов оказались достаточно надежными, то традиционные чисто статистические методы оценки их долговечности в режимах применения не позволяли получать даже минимально необходимую статистическую информацию. Это обстоятельство стимулировало развитие методов ускоренной оценки надежности ИЭТ в форсированных по температуре и электрической нагрузке режимах. Первые исследования физики отказов ПП по результатам ускоренных испытаний принадлежат Д.С.Пеку и К.Х.Зирдту, разработке математических методов посвящены труды Г.Хана, В.Нельсона, Н.Сингпуреллы и других исследователей. Большой вклад в общую теорию ускоренных испытаний

внесли отечественные ученые Карташов Г.Д., Кордонский Х.Б., Перротте А.И., Судаков Р.С., Тескин О.И. и другие. Фундаментальные исследования в области физики отказов ПП и ИС, принадлежащие Миллеру Ю.Г., Сотскову Б.С., Чернышеву А.А. и другим, позволили адаптировать разработанную ранее теорию ускоренных испытаний применительно к ИЭТ. В этом направлении успешно работали Гаскаров Д.В., Горюнов Н.Н., Куликов И.В., Манулик С.А., Смирнов А.Н. и другие.

Наиболее важным вопросом, возникающим при организации и проведении ускоренных испытаний, является выбор теоретической модели надежности ПП и ИС, так как, например, расхождение результатов прогноза показателей надежности типа средняя наработка до отказа в зависимости от принятой модели может составлять несколько порядков. Методы ускоренных испытаний на надежность принято разделять на непараметрические и параметрические.

В главе 1 на основе анализа публикаций произведена классификация методов ускоренных испытаний, в основу которой положена используемая теоретическая модель надежности изделия.

В связи с тем, что испытания ПП и ИС в режимах применения не позволяют получить представительные выборки, поэтому среди непараметрических методов наиболее предпочтительными оказываются частично ускоренные методы испытаний, реализующие принцип "доламывания" /Троут, Карташов, Кордонский и др./ . Однако программы, реализующие принцип "доламывания", имеют ограниченное применение для испытаний на надежность ИЭТ, так как требуют получения порядка 50% отказов изделий в выборке, что практически не реализуемо на сегодняшний день. Кроме того реализация принципа "доламывания" предполагает наличие линейной связи между моментами отказов изделия в разных по жесткости форсированных режимах, т.е., предполагается, что вид закона распределения наработки до отказа и его параметр формы останутся неизменными, а изменяется лишь параметр масштаба. Однако исследованиями установлено, что такое допущение может иметь место лишь в очень узком диапазоне нагрузок, что сильно ограничивает практическое использование данных методов. Вследствие отсутствия возможности получения представительных выборок, необходимых при непараметрических методах, более эффективными в данной области представляются параметрические методы.

Параметрические методы оценки и прогнозирования надежности ПП и ИС по результатам ускоренных испытаний опираются на постулат о неизменности вида закона распределения, постоянстве пара-

метра формы и зависимости параметра масштаба от уровня прилагаемой нагрузки в соответствии с известным уравнением Аррениуса-Эйринга /Горюнов, Куликов, Смирнов, Дроневиц и др./. Изучая физику отказов ИЭТ, авторы определяют основные деградационные процессы, протекающие в материалах и приводящие в состояние отказа, выявляют доминирующий процесс, оценивают его энергию активации или кажущуюся энергию активации изделия в целом по результатам двухступенчатых форсированных испытаний, описывают зависимость параметра масштаба от воздействующих факторов уравнением Аррениуса-Эйринга, а в качестве теоретической модели надежности используют разнообразные функции распределения случайных величин, заимствованные из математической статистики /Вейбулла, логарифмически-нормальное, экспоненциальное и др./.

Такой подход справедлив для достаточно простых изделий, в которых протекает либо один деградационный процесс, либо несколько, но с равными энергиями активации. Применительно к изделиям сложной структуры, какими являются, например ИС, кажущаяся энергия активации изделия в целом не всегда оказывается равной энергии активации доминирующего деградационного процесса. Это вызвано тем, что в ИЭТ одновременно протекает несколько деградационных процессов с разными энергиями активации. В процессе изменения нагрузки происходит перераспределение долей отказов по каждому из деградационных процессов и игнорирование этого явления связано со значительными погрешностями в оценке показателей надежности по результатам форсированных испытаний. Исследованиями также установлено, что кажущаяся энергия активации изделия в этом случае не является константой, а имеет сложную функциональную зависимость от уровней термической нагрузки, при которых она измеряется.

Проведенный анализ существующих моделей надежности ИЭТ и связанных с ними методов ускоренных испытаний показал, что на сегодняшний день не существует удовлетворительной инженерной модели надежности ИЭТ и ИС, учитывающей все многообразие деградационных процессов без каких либо ограничений на их количество и характеристики. Таким образом, ставится задача разработки таких математических моделей надежности ИЭТ и ИС, которые связывали бы количественные показатели надежности изделий с характеристиками процессов деградации.

Подробнее поставленные выше задачи будут рассмотрены в последующих главах.

Во второй главе решается задача построения вероятностно-физической модели надежности ПП и ИС.

Анализ физических процессов деградации, протекающих в материалах /полупроводниках, диэлектриках, металлах/, из которых изготавливаются ИЭТ, показывает, что они имеют случайную природу, являются термически активируемыми, причем изменение значений их определяющих параметров носит, как правило, немонотонный характер.

Выполненный анализ проблемы экспериментальной оценки надежности ИЭТ свидетельствует о том, что строго вероятностные концепции как непараметрические, так и параметрические представляются явно недостаточными. Из-за ограниченной статистики не могут полноценно использоваться и более адекватные, по сравнению с экспоненциальным распределением, строго вероятностные модели, такие как Вейбулла и логарифмически нормальное распределение.

Существует и другой, развиваемый в диссертации путь установления количественных показателей надежности изделий, который в отличие от описанного выше подхода использует информацию не только об отказах, но и о значениях некоторых физических параметров, характеризующих их техническое состояние. Такой подход, названный позднее вероятностно-физическим, развивали отечественные ученые Абрамов О.В., Васильев Б.В., Дружинин Г.В., Сотсков Б.С., Стрельников В.П. и другие. Методология этого подхода состоит в выявлении кинетических закономерностей физических процессов деградации и определении распределения вероятностей достижения этими процессами критического уровня, характеризующего предельное /отказовое/ состояние изделия. Параметры получаемых вероятностных распределений отказов имеют конкретную физическую интерпретацию, а такие модели принято называть вероятностно-физическими. Вероятностно-физические модели имеют большое преимущество перед строго вероятностными моделями надежности, заключающееся в том, что их параметры могут быть оценены как на основе статистики отказов, если таковая существует, так и на основании анализа физических процессов деградации, а также с помощью комбинации этих двух способов.

Анализ известных вероятностно-физических моделей /альфа-распределение, нормальное-параметрическое, диффузионные  $DN$  и  $DM$ -распределения/ показал, что для ИЭТ наиболее адекватным является  $DM$ -распределение, полученное в результате аппроксимации процесса деградации непрерывным марковским процессом диффузионного типа с немонотонными реализациями.

В формализации этой модели предполагается, что процесс деградации является однородным, то есть с постоянной средней скоростью  $\lambda$  и постоянным среднеквадратическим отклонением скорости. В этом случае кинетическое уравнение процесса представляет собой стохастическое дифференциальное уравнение первого порядка /типа Ито/. Используя математический аппарат теории непрерывных марковских процессов диффузионного типа, в частности уравнение диффузии Фоккера-Планка-Колмогорова, получен закон распределения наработки до отказа / $DN$ -распределение/, функция плотности которого имеет следующий вид:

$$f(t; \lambda, \nu) = \frac{\lambda}{\nu \sqrt{2\pi t \lambda}} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda t)^2}{2\nu^2 \lambda t}\right], \quad /1/$$

где  $\nu$  - параметр формы /коэффициент вариации наработки до отказа или коэффициент вариации скорости обобщенного процесса деградации/.

В главе 2 подробно исследованы основные характеристики и свойства  $DN$ -распределения. Разнообразие форм кривых плотности и интенсивности отказов /рис.1/ свидетельствует об универсальном характере распределения и его больших возможностях по выравниванию разнообразных статистических данных. Параметры  $DN$ -распределения имеют достаточно простые связи с количественными показателями надежности, например, средняя наработка до отказа является обратной величиной параметра масштаба  $T = \lambda / \nu$ .

$DN$ -распределение, как вероятностно-физическая модель, выгодно отличается от строго вероятностных моделей многообразием способов оценок его параметров. В диссертации получены максимально-правдоподобные оценки параметров распределения при использовании статистических данных об отказах для различных планов испытаний, в том числе для цензурированной выборки. Состоятельные оценки параметров распределения, соответствующие их физической интерпретации /средняя скорость и коэффициент вариации скорости/ достаточно просты. В диссертации разработана методология оценки этих параметров на основе измерения характеристик процесса деградации III и IV. Для наиболее часто встречающегося на практике случая, когда в результате испытаний выборки ИЭТ наблюдаются лишь единичные отказы, предлагается метод квантилей. Показано, что этот метод позволяет по нескольким отказам довольно просто оценить не только среднюю скорость деградации  $\lambda$ , но и второй момент - параметр формы  $\nu$ . Разработанный в диссертации графоаналитический метод оценки параметров  $DN$ -распределения, основанный на моделировании функции  $L(t)$ , используется в качестве критерия совпадения эмпирической и теорети-

ческой оценок момент смены знака тренда  $h$  зависимости  $\mathcal{L}(t)$ , построенной для различных значений  $v$ .

Современные ПШ и особенно ИС с высокой степенью интеграции являются сложными и достаточно высоконадежными изделиями. Поэтому решение задачи экспериментальной оценки надежности ИЭТ по результатам форсированных испытаний требует дальнейшего развития. Оно связано с привлечением разнообразной априорной информации, полученной в результате фундаментальных исследований физики отказов, испытаний и эксплуатации близких по технологии производства аналогов.

Так как ИЭТ подвержены одновременному действию нескольких процессов деградации /некоррелированных или слабокоррелированных между собой/, которые протекают в квазиэлементах, представляющих собой группы микрокомпонентов, объединенные протеканием одного типа процесса деградации, то обобщенный процесс деградации изделия является объединением этих процессов. Любой отказ ПШ и ИС можно идентифицировать тому или иному процессу деградации, а любое распределение отказов на качественном уровне представляет собой совокупность подмножеств отказов с характеристикой  $P_j$ , представляющей безразмерную величину - долю отказов по  $j$ -му процессу деградации / $\sum_{j=1}^m P_j = 1$ , где  $m$  - количество процессов деградации/. Если каждый из  $m$  квазиэлементов /по числу деградационных процессов/ утрачивает свой ресурс с некоторой постоянной средней скоростью  $\mathcal{L}_j$ , и имеет  $DN$ -распределение наработки до отказа, то средняя скорость обобщенного процесса деградации изделия в целом может быть вычислена следующим образом  $\mathcal{L} = (\sum_{j=1}^m \mathcal{L}_j^2)^{1/2}$ . Параметр формы  $v$ , состоятельной оценкой которого является коэффициент вариации обобщенного процесса деградации, определяется исходя из независимости составляющих процессов по формуле

$$v = v = \left( \sum_{j=1}^m v_j^2 \mathcal{L}_j^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{j=1}^m \mathcal{L}_j^2 \right)^{-1/2}$$

где  $v_j$  - коэффициент вариации  $j$ -го процесса деградации. Используя априорную информацию о долевом участии каждого составного процесса деградации  $P_j$  в обобщенном процессе деградации, выражение для оценки параметра формы принимает вид

$$v = v = \left( \sum_{j=1}^m v_j^2 P_j^2 / \sum_{j=1}^m P_j^2 \right)^{1/2} \quad /2/$$

Данный подход к оценке параметров  $DN$ -распределения, основанный на использовании априорной информации о процессах деградации,

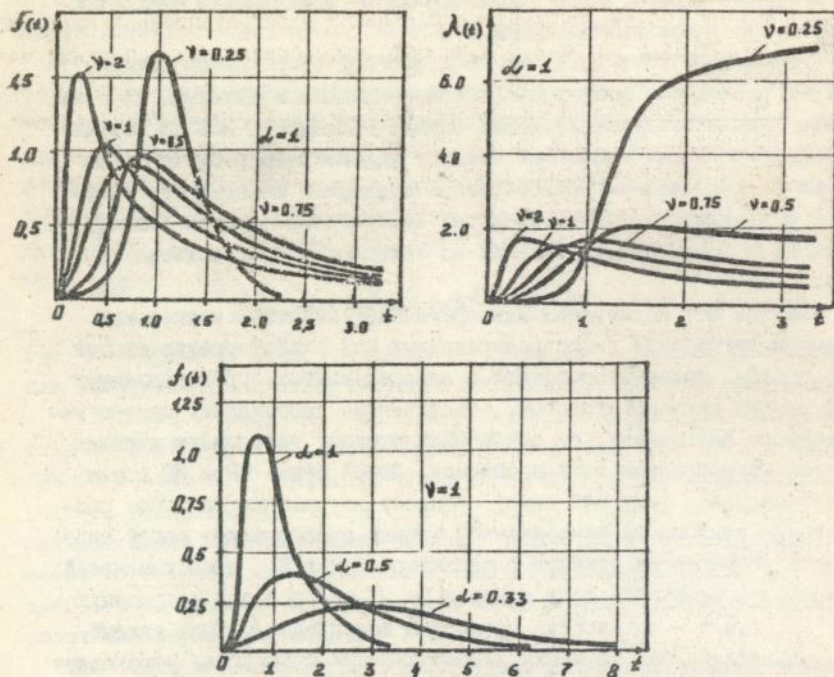


Рис.1 Зависимости плотности и интенсивности  $DN$ -распределения от параметра масштаба  $d$  и параметра формы  $\gamma$

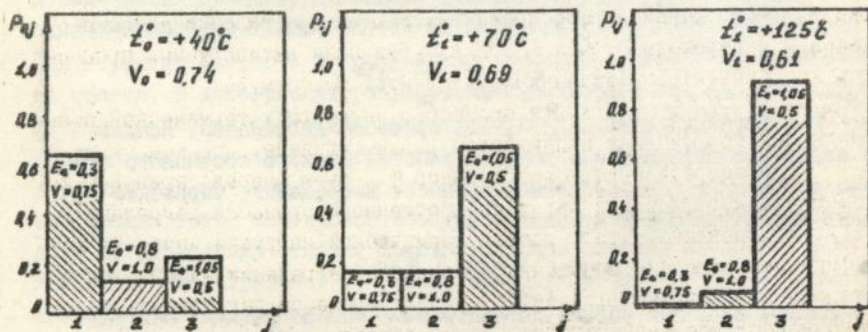


Рис.2 Диаграммы Парето КМЮП-микроспроцессоров:  
1,2,3 - типы процессов деградации

позволяет не только расширить наши знания о деградационной картине ИЭТ, но и строить на этой основе методы форсированных испытаний на надежность.

Третья глава посвящена разработке методов форсированных испытаний на надежность ПШ и ИС на основе описанной выше модели отказов. Математическая модель отказов ИЭТ однозначно определяется типом математических моделей составляющих квазиэлементов. Априорное представление функции распределения наработки до отказа изделия в целом и квазиэлементов в частности в виде  $DM$ -распределения нмжно упрощает решение поставленной задачи.

Поскольку термическая нагрузка для ИЭТ является основным и наиболее универсальным форсирующим фактором, то прежде всего исследуется влияние температуры на характер деградационной картины ПШ и ИС. Деградационную картину изделия удобно изображать в виде диаграммы Парето, связывающей типы и долевое участие составных процессов деградации и их характеристики  $E_{aj}$  и  $V_j$ . На диаграмме также указывается температура полупроводниковой пластины, для которой она построена / рис.2/.

При любом изменении термической нагрузки относительно температуры применения  $t_0^*$  происходит перераспределение долей отказов по каждому процессу деградации. Обозначив через  $P_j$  долю отказов по  $j$ -му процессу деградации в режиме испытаний с  $t_i^*$ , отличным от режима применения с  $P_{aj}$ , можно выполнить преобразование диаграммы Парето, заключающееся в пересчете  $P_j$  в зависимости от  $P_{aj}$  и  $K_{Fij}$  для любого форсированного режима:

$$P_j = P_{aj} K_{Fij} / \left( \sum_{j=1}^m P_{aj} K_{Fij} \right), \quad /3/$$

где  $K_{Fij}$  - коэффициент форсирования скорости деградации  $j$ -го процесса при переходе от  $t_0^*$  к  $t_i^*$ . Для термически активируемых процессов коэффициент форсирования вычисляется по формуле

$K_{Fij} = \exp\left[\frac{E_{aj}}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_i}\right)\right]$ . Для процессов, не имеющих термической составляющей, коэффициент принимается равным единице.

Перераспределение долей отказов  $P_j$  в свою очередь приводит к изменению коэффициента вариации обобщенного процесса деградации /2/. Установлено, что с ростом термической нагрузки значение коэффициента вариации обобщенного процесса деградации изменяется в сторону величины коэффициента вариации процесса деградации, имеющего наибольшее значение  $E_a$ . Таким образом, постулат о постоянстве параметра формы распределения отказов при форсировании термической нагрузки, на котором базируются почти все существующие

методы форсированных испытаний, для большинства III и ИС являются неприемлемым. Учет этого факта в рамках разработанной в диссертации модели надежности ИЭТ позволяет значительно повысить адекватность результатов форсированных испытаний на надежность.

Знание реальной деградационной картины ИЭТ, наблюдающейся в процессе изменения термической нагрузки, позволяет оценить величину достигаемого коэффициента форсирования обобщенного процесса деградации при переходе от температуры применения  $t_0^*$  к температуре испытаний  $t_1^*$ :

$$K_{\text{ФИ}} = \left[ \left( \sum_{j=1}^m \rho_{ij}^2 \right) \left( \sum_{j=1}^m \rho_{ij}^2 / K_{\text{ФИ}j}^2 \right)^{-1} \right]^{1/2} \quad /4/$$

Полученная таким образом оценка коэффициента форсирования учитывает явление замены доминирования между деградационными процессами, имеющими разные энергии активации. Для сложных изделий, состоящих из нескольких микроэлементов, например, гибридная ИС или микросборка, средние скорости деградации  $d_{эj}$  которых известны, а надежность схема является последовательной, коэффициент форсирования вычисляется по формуле:

$$K_{\text{ФИ}} = \left( \sum_{j=1}^K n_j d_{эj}^2 K_{\text{ФИ}j}^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{j=1}^K n_j d_{эj}^2 \right)^{-1/2}$$

где  $K$  - количество типов элементов;  $n_j$  - количество элементов  $j$ -го типа;  $d_{эj}$  - средняя скорость деградации элементов  $j$ -го типа;  $K_{\text{ФИ}j}$  - коэффициент форсирования, для каждого типа элементов вычисляется по формуле/4/. Параметр формы  $\mathcal{D}\mathcal{N}$ -распределения в этом случае имеет следующее выражение:

$$V = V = \left( \sum_{j=1}^K n_j d_{эj}^2 V_{эj}^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{j=1}^K n_j d_{эj}^2 \right)^{-1/2}$$

На основе проведенных исследований в главе 3 разработан расчетно-экспериментальный метод /РЭМ/ оценки надежности III и ИС по результатам форсированных испытаний. Оценка эффективности метода производилась как на экспериментальных данных, так и путем статистического моделирования с помощью специально разработанного пакета программ *FORSTAT* и показала практическое совпадение теоретических и экспериментальных результатов.

В третьей главе также рассмотрены вопросы планирования форсированных испытаний ИЭТ на безотказность. В рамках разработанного РЭМ, когда по результатам форсированных испытаний оценивается лишь значение средней скорости деградации в форсированном режиме  $d_1$ , а величина достигнутого при этом коэффициента форсирования  $K_{\text{ФИ}}$  определяется расчетным путем, зависимость относительной ошибки в оценке средней наработки до отказа в режиме применения имеет следующее выражение:

$$\delta_{\tau_0} = \delta_{\alpha_1} = \frac{V_{i.0\pi} U_p}{2 \tau_1} (4 \tau_1 + V_{i.0\pi}^2 U_p^2)^{1/2} \quad /5/$$

где  $V_{i.0\pi}$  — ожидаемое значение коэффициента вариации наработки до отказа изделия в форсированном режиме, задается априори или оценивается по формуле /2/;  $U_p$  — квантиль нормированного нормального распределения. Необходимый объем наблюдений, исходя из уравнения /5/, определяется по формуле

$$\tau_2 = \left( \frac{V_{i.0\pi} U_p}{\delta_{\tau_0}} \right)^2 (1 + \sqrt{1 + \delta_{\tau_0}^2}) / 2.$$

В тех случаях, когда возникает необходимость интервального оценивания коэффициента форсирования  $K_{\phi/2} = d_2/d_1$  и планирования испытаний по его измерению, например, для определения  $E_{0j}$  процесса деградации, то зависимость относительной ошибки в оценке средней величины  $K_{\phi/2}$  может быть вычислена следующим образом:

$$\delta_{K_{\phi/2}} = \frac{U_p}{2} \sqrt{\left( \frac{V_{i.0\pi}^2}{\tau_1} + \frac{V_{i.0\pi}^2}{\tau_2} \right) \left[ 4 + \left( \frac{V_{i.0\pi}^2}{\tau_1} + \frac{V_{i.0\pi}^2}{\tau_2} \right) U_p^2 \right]}. \quad /6/$$

Выражение /6/ позволяет выбрать необходимый объем наблюдений на первой /  $\tau_1$  / и второй /  $\tau_2$  / ступенях испытаний.

Четвертая глава посвящена исследованию явления бимодальности распределения отказов ПИ и ИС.

В процессе испытаний ИЭТ на надежность часто регистрируются так называемые "ранние отказы", доля которых колеблется от единиц до десятков процентов. Распределение этих отказов характеризуется низкими значениями средней наработки до отказа и энергии активации и является причиной бимодального характера плотности распределения, т.е. распределения, формируемого основной и аномальной группами изделий.

Одной из причин бимодальности является наличие в выборке некоторой группы изделий с грубыми технологическими дефектами. Другой причиной появления бимодальности распределения отказов является жесткое однофакторное форсирование в процессе испытаний ПИ и ИС на надежность. Для описания такого рода выборок в диссертации предлагается математическая модель надежности ИЭТ с аномальной группой, представляющая собой композиционное  $DN$ -распределение, имеющее двухмодальную плотность и описываемое одновременно как основную, так и аномальную группы изделий:

$$f(t; d_1, d_2, \nu_1, \nu_2) = \sum_{i=1}^k P_i f_i(t; d_i, \nu_i); \quad \sum_{i=1}^k P_i = 1,$$

где  $P_i$  — вклад соответствующей компоненты в общий процесс деградации.

Для случая, когда значения  $\rho_1$  и  $\rho_2$  известны, а  $V_1 = V_2$ , получены максимально-правдоподобные оценки параметров  $d_1$ ,  $d_2$  и  $V$  для полной выборки. В тех случаях, когда имеется сильно цензурированная выборка, в диссертации разработана процедура оценки параметров распределения методом квантилей. На этой основе разработан РЭМ оценки надежности ПП и ИС по результатам форсированных испытаний с учетом наличия аномальной группы изделий. Дополнительными исходными данными для РЭМ являются результаты, полученные в процессе электротермотренировки ИЭТ. Использование априорной информации о типах и характеристиках деградационных процессов, протекающих в изделиях основной и аномальной групп, а также распределение "ранних отказов" в форсированном по температуре режиме на этапе ЭТТ позволяет оценить все параметры композиционного  $\mathcal{M}$ -распределения наработки до отказа в режиме применения.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе в целом.

В приложении помещены вспомогательные таблицы, необходимые для реализации разработанных РЭМ и планирования форсированных испытаний ПП и ИС на надежность, приводятся тексты программ пакета прикладных программ по обработке результатов и статистическому моделированию форсированных испытаний *FORSTAT*.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Главным результатом диссертационной работы можно считать разработку новых вероятностно-физических моделей надежности ИЭТ, в рамках которых изделие представляется в виде последовательной цепочки квазиэлементов, количество которых соответствует количеству деградационных процессов, протекающих в нем одновременно. На этой основе предложены расчетно-экспериментальные методы получения точечных и интервальных оценок средней скорости деградации, определена ее связь с количественными показателями надежности изделий, разработаны методы планирования форсированных испытаний ПП и ИС на надежность. Более подробно основные результаты работы, выносимые автором на защиту, состоят в следующем:

1. На основании анализа физических процессов деградации ИЭТ, а также результатов их испытаний показано, что наиболее адекватной моделью отказов ПП и ИС является двухпараметрическое диффузионное распределение /  $\mathcal{M}$ -распределение /.

2. На основе представления сложного процесса деградации ИЭТ в виде ряда одновременно действующих элементарных деградационных процессов, протекающих в квазиэлементах, построена новая теоретическая модель надежности ШП и ИС. При этом распределение отказов каждого квазиэлемента и изделия в целом описывается  $\mathcal{M}$ -распределением.

3. Получены выражения максимально-правдоподобных оценок параметров  $\mathcal{M}$ -распределения для полных и цензурированных выборок. Предложены оценки параметров распределения методом квантилей и на основе измерения характеристик процесса деградации.

4. В результате исследований влияния температуры на характер деградационной картины ИЭТ разработана процедура преобразования диаграммы Парето, получено выражение для расчетной оценки коэффициента форсирования скорости деградации.

5. Разработан расчетно-экспериментальный метод оценки средней скорости деградации ИЭТ с учетом явления замены доминирования между составными процессами деградации.

6. Получено аналитическое выражение для оценки коэффициента форсирования интенсивности отказов ИЭТ и выявлена его взаимосвязь с коэффициентом форсирования скорости деградации.

7. Получены выражения для интервальных оценок параметров  $\mathcal{M}$ -распределения по результатам испытаний. Разработана процедура планирования форсированных испытаний на безотказность.

8. В результате исследования бимодальных распределений отказов ШП и ИС предложено композиционное  $\mathcal{M}$ -распределение наработки до отказа. Получены выражения максимально-правдоподобных оценок этого распределения для полных выборок. Разработан расчетно-экспериментальный метод оценки средней скорости деградации ИЭТ с учетом аномальной группы изделий.

9. На значительном экспериментальном материале и посредством статистического моделирования на ЭВМ показано, что  $\mathcal{M}$ -распределение хорошо описывает эмпирические распределения отказов различных ИЭТ, а разработанные на его основе расчетно-экспериментальные методы форсированных испытаний позволяют получать более точные оценки показателей надежности ШП и ИС.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Федухин А.В. Моделирование ресурса ИЭТ в различных температурных режимах эксплуатации //Моделирование и разработка интегральных структур микроэлектронных устройств.-Киев:Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР,1986.-С.47-51.
2. Федухин А.В. Ускоренные испытания на надежность СВТ //Все-союз.науч.-техн.симп. "Надежность и качество в приборостроении и радиоэлектронике": Тез.докл.-М.:Радио и связь,1986.-С.30-31.
3. Методические рекомендации по экспериментальной оценке показателей надежности ЭВМ /В.П.Стрельников, Л.И.Бутенко, А.М.Лучанский, А.В.Федухин, В.В.Садовой.-Киев:Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова АН УССР,1987.- 60 с.
4. Федухин А.В. Использование априорной информации при форсированных испытаниях ИЭТ //Всесоюз.науч.-техн.конф. "Конструктивно-технологические методы повышения надежности и их стандартизация": Тез.докл.- Тула:ТулПИ,1988.- С.110.
5. Федухин А.В. Априорная оценка коэффициента форсирования скорости деградации ИС //Проектирование элементов и узлов ЭВМ.- Киев:Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова АН УССР,1988.- С.21-26.
6. Бутенко Л.И., Стрельников В.П., Федухин А.В. Планы контроля показателей надежности на основе диффузионного распределения //Всесоюз.науч.-техн.конф. "Конструктивно-технологические методы повышения надежности и их стандартизация":Тез.докл.- Тула:ТулПИ, 1988.- С.111.
7. Стрельников В.П., Федухин А.В. Вероятностно-физический подход в задачах оценки надежности ИЭТ по результатам форсированных испытаний //Зональная конф. "Методы оценки и повышения надежности РЭА":Тез.докл.- Пенза:Знание,1989.- С.64-66.
8. Федухин А.В. Расчетно-экспериментальный метод оценки надежности ИЭТ по результатам форсированных испытаний //Надежность и контроль качества.-1989.- №9.- С.8-11.
9. Стрельников В.П., Федухин А.В. Априорная оценка коэффициента форсирования скорости деградации РЭА при переходе к повышенной температуре испытаний //Зональная конф. "Методы оценки и повышения надежности РЭА":Тез.докл.-Пенза:Знание,1990.- С.45-46.
10. Федухин А.В. Оценка доверительных границ для коэффициента форсирования при диффузионном законе распределения отказов // Науч.-техн.семинар "Вероятностно-физические методы исследования

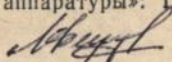
надежности машин и аппаратуры»: Тез. докл. — Киев : Знание, 1990. — С. 46—47.

11. Федухин А. В., Бутенко Л. И. Композиционное диффузионное распределение для описания выборок с аномальной группой // Науч.техн. семинар «Вероятностно-физические методы исследования надежности машин и аппаратуры»: Тез. докл. — Киев : Знание, 1990. — С. 48—49.

12. Сердюк Г. Б., Стрельников В. П., Федухин А. В. Вопросы оценки показателей надежности ПП и ИМС по результатам ускоренных испытаний // Республ. науч.-техн. конф. «Бытовая радиоэлектронная аппаратура: управление качеством и надежностью»: Тез. докл. — Одесса : ПФ НИИ ТТ «Электрон», 1990. — С. 45—46.

13. РД 50-690-90. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. — Введ. 01.01.91.

14. Федухин А. В. Пакет программ по обработке и моделированию форсированных испытаний ИЭТ // Науч.-техн. семинар «Вероятностно-физические методы исследования надежности машин и аппаратуры»: Тез. докл. — Киев : Знание, 1992. — С. 60—62.



Подл. в печ. 24.01.94. Формат 60×84/16. Бум. писч. №2. Офс. печ. Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,05. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 199.

Редакционно издательский отдел с полиграфическим участком  
Института кибернетики имени В. М. Глушкова АН Украины  
252207, Киев 207, проспект Академика Глушкова, 40.

457535

AB 30.013  
**AB 30.013**