

**На правах рукописи**

**АБДРАФИКОВ Михаил Асхатович**

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ  
НА ОСНОВЕ АППАРАТА ПОРЯДКОВЫХ СТАТИСТИК  
(на примере блоков станции коммутации  
и каналообразования сетей связи)**

**Специальность 05.13.01  
Системный анализ, управление и обработка информации  
(промышленность)**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа – 2012**



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одним из наиболее развивающихся на сегодняшний день рынков является рынок телекоммуникационных услуг. Широко распространены ведомственные сети связи, создающиеся для удовлетворения нужд министерств, ведомств и предприятий. Для ведомственных сетей связи специального назначения характерны высокие требования к надежности входящего в их состав телекоммуникационного оборудования, в значительной степени зависящей от надежности входящих в его состав электронных модулей.

Высокие требования к надежности телекоммуникационного оборудования сетей связи специального назначения, с одной стороны, и невозможность 100 % контроля соответствия применяемых электрорадиоизделий заявленным производителем характеристикам; рост числа случаев поставок контрафактных электрорадиоизделий; необходимость учета влияния технологических процессов производства на надежность выпускаемых изделий, с другой стороны, приводят к необходимости оценки надежности по данным об отказах (экспериментальные методы).

Развитые технологии производства телекоммуникационного оборудования и ограниченное число выпускаемых изделий для ведомственных сетей связи специального назначения зачастую не позволяют получать значительное число данных об отказах. Следствием этого является то, что использование традиционных методов математической статистики для оценивания характеристик надежности данного класса изделий встречает серьезные затруднения.

Существуют различные подходы к анализу надежности в условиях малого числа исходных данных: ускоренные испытания; специальный аппарат математико-статистической обработки данных; использование экспертных оценок, теории нечетких множеств и др. Несмотря на внушительное число работ (Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, И. А. Ушаков, А. Д. Соловьев, Н. К. Зайнашев, А. М. Половко, И. М. Хомяков, Дж. Нейман, К. Шеннон, А. Пирс, Я. К. Барлоу, С. Прошан, В. К. Дедков, Н. А. Северцев, И. Б. Шубинский, Л. В. Уткин, В. Г. Крымский, В. Н. Ефанов и многие др.), существующие методы анализа надежности в основном нацелены на получение по выборочным данным осредненных значений характеристик надежности объектов.

При исследовании надежности систем ответственного назначения, к числу которых относятся ведомственные сети связи специального назначения, целесообразно оценивать граничные значения характеристик надежности, т.е. оценивать надежность не «в среднем», а «в худшем случае». Математической основой анализа граничных значений характеристик надежности является аппарат порядковых статистик, а именно раздел, посвященный крайним порядковым статистикам. Известны работы Борткевича, фон Мизеса, Доджа, Неймана, Фреше, Типпета, Трикоми, Б. де Финетти, Фишера, Э. Гумбеля, Я. Галамбоша, В. Б. Невзорова, К. Барри, Е. Кастильо, Г. Линдгрена, М. Г. Лидбеттера и многих других. Большинство данных работ посвящено теории асимптотических крайних порядковых статистик. При этом, как правило, предполагается, что закон распределения непрерывной случайной величины заранее известен.

Подходы, ориентированные на оценивание граничных значений характеристик надежности, не получили достаточного развития при малом числе данных об отказах, а также для случая, когда тип закона распределения наработки до отказа заранее не известен. Особенностью известных методов и моделей является то, что их использование связано с вычислительными трудностями. Это накладывает существенное ограничение на возможность применения известных моделей в инженерной практике.

### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является повышение надежности электронных модулей радиоэлектронных средств за счет разработки методов, алгоритмов и методик оценивания граничных значений характеристик надежности по данным об отказах и их использования для обработки данных, характеризующих надежность объектов на этапе подконтрольной эксплуатации.

### **Задачи исследования**

1. Разработать комбинированную модель оценивания граничных значений характеристик надежности электронных модулей радиоэлектронных средств для случая малого числа выборочных данных, в том числе, когда тип закона распределения наработки до отказа заранее неизвестен.

2. Разработать алгоритм оценивания граничных значений характеристик надежности, позволяющий упростить вычислительную процедуру оценки граничных значений характеристик надежности по экспериментальным данным, в том числе, по выборкам малого объема.

3. Исследовать доверительные оценки граничных значений характеристик надежности электронных модулей радиоэлектронных средств, а также зависимость свойств оценок граничных значений характеристик надежности от особенностей исходных данных и продолжительности эксплуатации.

4. На основе полученных теоретических результатов разработать инженерные методики для оценивания граничных значений характеристик надежности радиоэлектронных средств, а также реализующий их прототип программного продукта. Использовать разработанные методики для оценки надежности электронных модулей систем коммутации и каналообразования сетей связи по данным об отказах на этапе подконтрольной эксплуатации.

### **Методическая база и методы исследования**

Для решения поставленных задач в диссертационной работе использованы методы системного анализа, математической статистики, теории надежности, теории порядковых статистик, методы вычислительного эксперимента и теории информации.

**Объектом исследования** является надежность электронных модулей сложных систем.

**Предметом исследования** являются статистические методы оценки граничных значений характеристик надежности электронных модулей радиоэлектронных средств по малому числу данных об отказах.

### **Результаты, выносимые на защиту**

1. Комбинированная модель для оценивания граничных значений характеристик надежности электронных модулей радиоэлектронных средств при ма-

лом числе выборочных данных, в том числе, когда тип закона распределения наработки до отказа заранее неизвестен.

2. Алгоритм оценивания законов распределения крайних значений элементов выборки, позволяющий упростить вычислительную процедуру оценивания граничных значений характеристик надежности по выборочным данным, в том числе, по выборкам малого объема.

3. Результаты исследования свойств доверительных оценок граничных значений характеристик надежности, закономерности изменения свойств доверительных границ законов распределения крайних элементов выборки, зависимость статистических свойств оценок граничных значений характеристик надежности от объема выборочных данных, точности их регистрации и продолжительности эксплуатации изделий.

4. Разработанные на основе полученных теоретических результатов алгоритмы, инженерные методики и реализующий их прототип прикладного программного продукта, позволяющий автоматизировать обработку малого числа данных об отказах, в том числе в случае, когда тип закона распределения наработки до отказа заранее не известен. Результаты обработки данных подконтрольной эксплуатации электронных модулей радиоэлектронных средств станций коммутации и каналообразования сетей связи.

#### **Научная новизна**

1. Научная новизна комбинированной модели для оценивания граничных значений характеристик надежности заключается в построении закона распределения непрерывной случайной величины за счет объединения разных параметрических моделей законов распределения непрерывных случайных величин и выработке решающего правила относительно схемы расчета в зависимости от объема исходных данных. Использование модели не требует априорного знания типа закона распределения непрерывной случайной величины. Определены границы применимости комбинированной модели.

2. Научная новизна алгоритма оценивания законов распределения крайних значений элементов выборки заключается в установлении закономерностей изменения моментов законов распределения крайних порядковых статистик от моментов закона распределения случайной величины. Это позволяет формализовать процедуру оценивания законов распределения крайних порядковых статистик и за счет этого повысить точность оценивания граничных значений характеристик надежности, в том числе, по выборкам малого объема, а также в случае, когда тип закона распределения заранее неизвестен.

3. Научная новизна результатов исследования особенностей доверительного оценивания граничных значений характеристик надежности состоит в том, что впервые исследованы статистические свойства оценок надежности при разных сечениях случайного аргумента. Впервые исследованы закономерности смещения оценок законов распределения граничных значений характеристик надежности в зависимости от времени эксплуатации и объема выборочных данных.

#### **Практическая значимость и внедрение результатов работы**

На основе полученных теоретических результатов разработаны алгоритмы и инженерные методики, позволяющие оценивать граничные значения ха-

рактических характеристик надежности при малом числе исходных данных, в том числе в случае, когда тип закона распределения наработки до отказа заранее не известен. Реализован прототип программного продукта, позволяющий специалистам в области управления надежностью сложных технических систем, детально не знакомым с особенностями аппарата порядковых статистик, на практике получать точечные и доверительные оценки граничных значений характеристик надежности. Техническая новизна прототипа программного продукта состоит в программной реализации разработанных инженерных методик.

Инженерные методики и прототип программного продукта внедрены в ОАО «НИИ «Солитон» и были использованы при оценивании надежности электронных модулей станции коммутации и каналообразования в составе автоматизированных цифровых сетей связи повышенной живучести по данным об отказах на этапе подконтрольной эксплуатации.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные теоретические и практические результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2009, 2011); XII международный семинар по информатике и информационным технологиям (Москва-СПб, 2010); XIII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2011); V, VI и VII Всероссийские зимние школы-семинары аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2010, 2011, 2012).

### **Основания для выполнения работы**

Работа выполнена на кафедре автоматизации проектирования информационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00359-а.

### **Публикации**

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 9 источниках, включающих 2 статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов из перечня ВАК при Минобрнауки РФ, и 7 публикаций в сборниках трудов конференций.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 121 наименований и приложений. Основная часть работы (без библиографического списка и приложений) изложена на 121 странице машинописного текста, включая иллюстрации и таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, обсуждаются новизна и практическая значимость результатов, а также кратко излагаются содержание и основные результаты работы.

**Первая глава** посвящена обзору существующих подходов к анализу надежности электронных модулей радиоэлектронных средств.

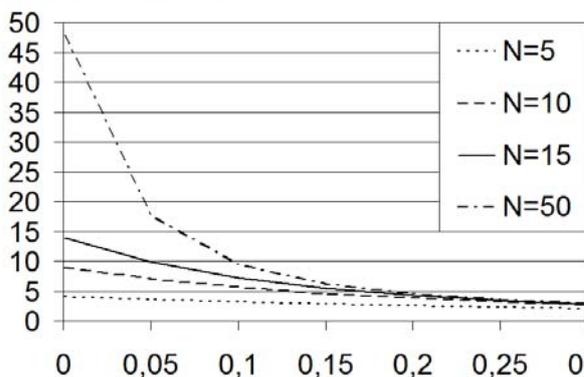
Приведены результаты анализа существующих методов оценки надежности электронных модулей радиоэлектронных средств, в том числе, ориентиро-

ванных на малый объем выборочных данных. Установлено, что существующие методы анализа надежности, широко используемые в инженерной практике, ориентированы на получение осредненных характеристик надежности, в то время как для систем ответственного назначения, к числу которых относятся ведомственные сети связи специального назначения, необходимо осуществлять анализ граничных значений характеристик надежности. Также установлено, что ограничениями полученных к настоящему времени результатов является то, что недостаточно исследованы особенности доверительного оценивания граничных значений характеристик надежности, не изучена зависимость статистических свойств оценок граничных значений характеристик надежности от особенностей исходных данных и продолжительности эксплуатации. Выяснено, что использование существующего аппарата порядковых статистик при решении задач анализа надежности требует априорного знания типа закона распределения наработки до отказа. Установлено, что непосредственное использование известных статистических методов оценивания законов распределения по малым выборкам, в том числе в случае, когда тип закона распределения заранее неизвестен, при оценивании граничных значений характеристик надежности встречает вычислительные трудности, что ограничивает возможность их практического использования на промышленных предприятиях специалистами, занятыми решением задач управления надежностью сложных технических систем.

В ходе анализа было установлено, что широко использовавшиеся ранее для обработки малых выборок методы, в основе которых лежат функции вкладов, являются частным случаем подхода, основанного на исследовании законов распределения порядковых статистик.

В ходе исследований были получены количественные характеристики, демонстрирующие различие оценок значений показателей надежности, получаемых известными методами анализа надежности, и оценками, получаемыми на основе исследования граничных значений характеристик надежности (рис. 1). На приведенном рисунке под относительной вероятностью отказа понимается отношение вероятности отказа, определяемой на основе минимальной порядковой статистики, к вероятности отказа, определяемой традиционным способом.

**Относительная  
вероятность отказа**



**Относительная  
вероятность отказа**

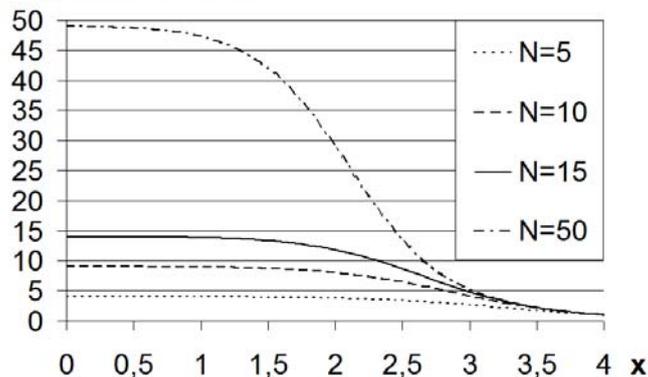


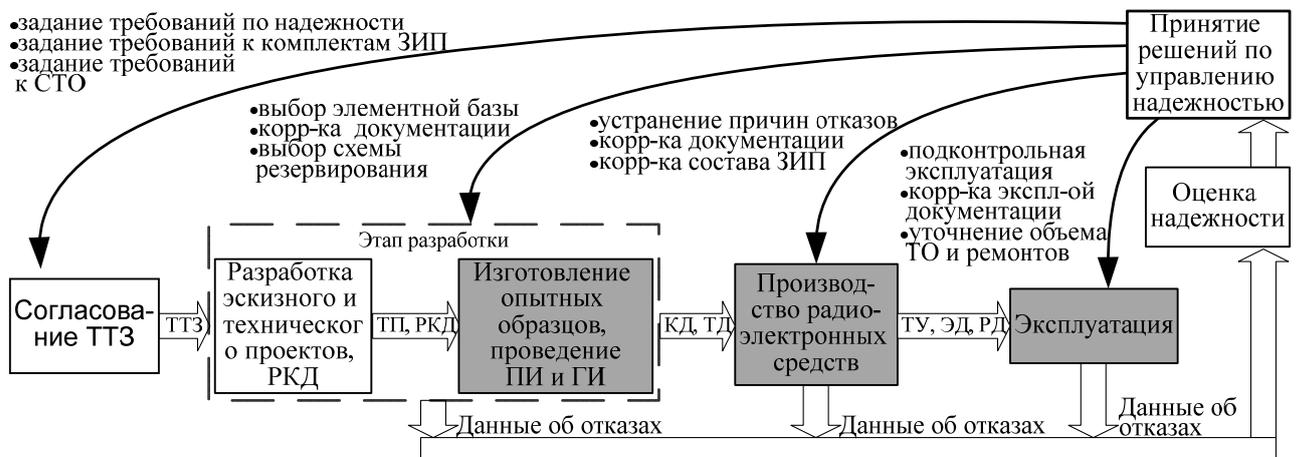
Рисунок 1 – Результаты представлены для показательного (слева) и усеченного нормального (справа) законов распределений.  $N$  – объем выборочных данных

Результаты исследования позволяют заключить, что оценивание надежности на основе известного подхода дает на начальных этапах эксплуатации завышенную, по сравнению с оценкой граничных значений, оценку характеристик надежности. Причем смещение тем больше, чем больше объем выборочных данных. Оценки граничных значений характеристик надежности тем быстрее сходятся к оценкам, получаемым традиционным способом, чем более асимметричным является закон распределения наработки до отказа. Установлено, что наиболее сильное различие наблюдается при малых значениях наработки до отказа. Из этого можно заключить, что оценивание надежности на основе минимальных выборочных значений наработки до отказа целесообразно для изделий ответственного назначения, для которых важно обеспечить требуемые значения характеристик надежности в любой момент гарантийного срока эксплуатации.

Обоснована целесообразность применения аппарата порядковых статистик для оценивания граничных значений характеристик надежности электронных модулей радиоэлектронных средств. По результатам исследований сформулированы цель работы и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена системному моделированию процессов управления надежностью электронных модулей радиоэлектронных средств; разработке комбинированной модели оценивания законов распределения крайних порядковых статистик и разработке алгоритма оценивания граничных значений характеристик надежности, позволяющего избежать вычислительных проблем, характерных для использования известных моделей законов распределения порядковых статистик; анализу влияния априорного знания типа закона распределения наработки до отказа и свойств исходных данных на точность и устойчивость оценок граничных значений характеристик надежности.

В ходе исследований построена структурная модель процессов производства электронных модулей радиоэлектронных средств аппаратуры связи (рис. 2), а также системные модели блоков процессов производства и эксплуатации (рис. 3).



**Использованы следующие сокращения:** ЗИП – запасные части, инструменты, принадлежности; ГИ – государственные испытания; КД – конструкторская документация; ПИ – предварительные испытания; РД – ремонтная документация; РКД – рабочая конструкторская документация; СТО – станция технического обслуживания; ТД – техническая документация; ТО – техническое обслуживание; ТП – технический проект; ТТЗ – тактико-техническое задание; ТУ – технические условия; ЭД – эксплуатационная документация.

Рисунок 2 – Архитектура процесса управления надежностью электронных модулей радиоэлектронных средств сетей связи

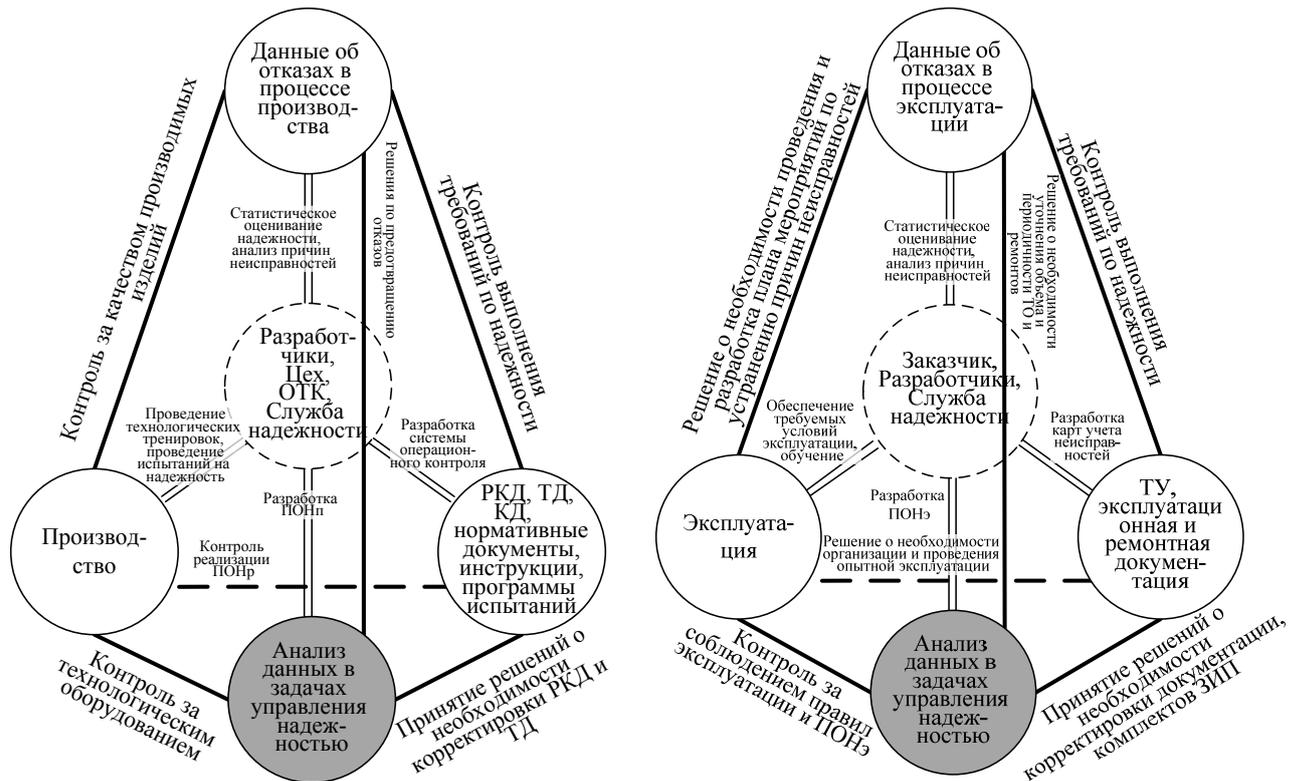


Рисунок 3 – Структура блока «Производство» (слева) и структура блока «Эксплуатация» (справа)

Полученные модели позволили установить место подсистемы обработки данных об отказах электронных модулей радиоэлектронных средств в системе информационной поддержки управления надежностью сложных технических систем, а также на качественном уровне оценить предполагаемые последствия от использования методов оценки граничных значений характеристик надежности. Использование оценок граничных значений характеристик надежности позволяет:

1. Рассмотреть дополнительные характеристики надежности в виде граничных значений характеристик надежности, что при тех же исходных данных позволяет повысить качество выпускаемых изделий и уменьшить неопределенность оценивания значений характеристик надежности за счет более детального исследования данных об отказах;

2. Формализовать методики анализа граничных значений характеристик надежности, разработать на их основе специализированные программные продукты, что создает предпосылки для их использования специалистами, детально не знакомыми с теорией порядковых статистик, за счет чего возможно повышение качества изделий;

3. Повысить обоснованность определения объемов и периодичности технического обслуживания, необходимого количества запасных частей, инструментов и принадлежностей. Обеспечить сокращение расходов, связанных с восстановительными работами в случае наступления гарантийного случая;

4. Повысить обоснованность требований тактико-технического задания в части гарантийных обязательств.

Основой известного подхода к анализу статистических особенностей порядковых статистик является выражение для дифференциальной функции распределения порядковой статистики:

$$\varphi_N(x_{(m)}) = \frac{N!}{(m-1)!(N-m)!} \cdot [F(x)]^{m-1} \cdot [1-F(x)]^{N-m} \cdot f(x) \quad (1)$$

где  $\varphi_N(x_{(m)})$  – дифференциальная функция распределения  $m$ -й порядковой статистики в выборке объема  $N$ ;

$F(x)$ ,  $f(x)$  – соответственно интегральная функция и плотность распределения генеральной совокупности.

В литературе описаны две модели, использование которых позволяет полностью формализовать процедуру оценивания  $F(x)$  на основе выборочных данных при априорно неизвестном законе распределения наработки до отказа. Первая модель основана на формализме Джейнса, реализующего принцип максимизации энтропии. Вторая модель – закон распределения Эрланга, являющийся частным случаем потоков Пальма. В диссертации приводится обоснование целесообразности использования данных моделей при оценивании граничных значений характеристик надежности, а также ссылки на литературу, в которой описаны методики применения моделей.

Комбинированная модель оценивания граничных значений характеристик надежности основана на анализе сходимости и устойчивости статистических характеристик экстремальных статистик в зависимости от свойств выборочных данных при использовании упомянутых выше моделей. Установлено, что для законов распределения непрерывных случайных величин, для которых справедливо ограничение  $0 \leq X < \infty$ , независимо от типа  $F(x)$ , при объеме выборки  $N \leq 10$  лучшие результаты получаются при использовании модели, основанной на формализме Джейнса, а при  $N \geq 10$  – на основе закона распределения Эрланга. Это позволило разработать простое решающее правило по выбору закона распределения случайной величины  $F(x)$  при разных объемах исходных данных, что позволяет в последующем оценивать законы распределения экстремальных статистик на основе (1).

Практическая реализация метода оценивания значений минимальной наработки до отказа в значительной степени ограничивается сложностью вычислительной процедуры, необходимой для проведения расчетов с использованием выражения (1). Сложность обусловлена необходимостью возведения малых величин в высокие степени. В ходе исследований был разработан алгоритм, позволяющий упростить вычислительную процедуру. Основу алгоритма составляют установленные в ходе исследований зависимости математических ожиданий и средних квадратических отклонений  $\varphi_N(x_1)$  от соответствующих закону распределения случайной величины  $F(x)$  математического ожидания, среднего квадратического отклонения и рассчитанного на их основе коэффициента вариации выборочных данных  $q[x]$ .

Фрагмент полученных зависимостей значений нормированного среднего квадратического отклонения минимальной порядковой статистики  $\sigma^{(H)}[x_1]$  от коэффициента вариации выборочных данных  $q[x]$  при разных объемах выборки

$N$  и различных законах распределения  $F(x)$  представлен на рис. 4. Фрагмент зависимостей нормированного математического ожидания минимальной порядковой статистики  $M^{(H)}[x_1]$  от нормированного математического ожидания  $M^{(H)}[x]$ , при разных объемах выборки  $N$  и различных законах распределения  $F(x)$  представлен на рис. 5.

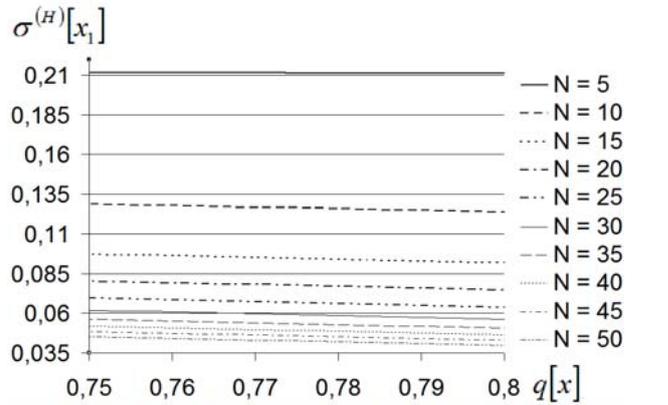


Рисунок 4 – Фрагмент зависимостей  $\sigma^{(H)}[x_1]$  от коэффициента вариации  $q[x]$ , соответствующих минимальной порядковой статистике

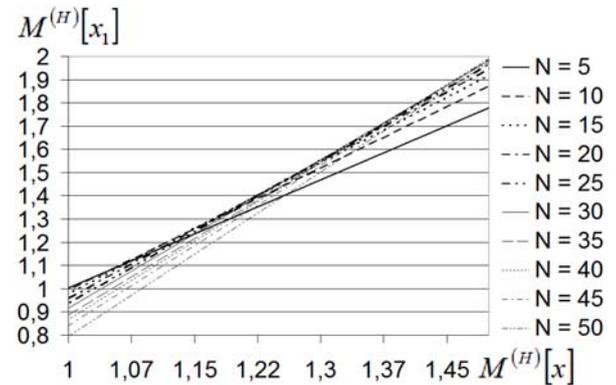


Рисунок 5 – Фрагмент зависимостей  $M^{(H)}[x_1]$  от  $M^{(H)}[x]$ , соответствующих минимальной порядковой статистике

Приводится описание алгоритма оценки граничных значений характеристик надежности, исключающего необходимость оценивания исходного закона распределения  $F(x)$ . Полученные в ходе проводившихся исследований номограммы позволяют по оценкам первых двух статистических моментов, определяемых по выборочным данным, оценить первые два момента закона распределения крайних элементов выборки, что делает возможным рассчитать оценки граничных значений характеристик надежности.

Представлены результаты анализа зависимости точности и устойчивости оценок граничных значений характеристик надежности, получаемых с использованием предлагаемого метода, от свойств исходных данных; приведены результаты исследований, направленных на анализ влияния априорного знания типа закона распределения на точность оценивания граничных значений характеристик надежности. Под свойствами исходных данных понимается объем выборочных данных, точность их регистрации и тип закона распределения генеральной совокупности  $F(x)$ , которой принадлежит исходная выборка. Установлено, что чем более ассиметричен вид закона распределения  $F(x)$ , тем ниже точность оценивания максимальной порядковой статистики относительно точности оценивания минимальной порядковой статистики. Эффективность оценок, в зависимости от типа закона распределения может различаться до 4,7 раз, причем тем значительнее, чем более ассиметричным является закон распределения наработки до отказа. В качестве показателя эффективности при проведении исследований использовалась метрика доминирования.

Было установлено, что точность оценивания крайних порядковых статистик с увеличением объема выборки повышается лишь в случае, когда погрешность регистрации исходных данных оказывается ниже 100%. Было установлено, что при низкой точности регистрации исходных данных целесообразно ис-

пользовать модель (1) даже в том случае, когда тип закона распределения наработки до отказа априорно известен.

В третьей главе приводятся результаты исследования свойств доверительных оценок граничных значений характеристик надежности. Решались две основные задачи: влияние объемов и точности регистрации выборочных данных на систематическую и случайную составляющие погрешностей оценок законов распределения крайних порядковых статистик  $\hat{\Phi}_N(x_1)$ ,  $\hat{\Phi}_N(x_N)$  и анализ статистических свойств (в том числе информативности) оценок минимальной порядковой статистики внутри доверительной области.

В ходе решения первой задачи рассматривался случай, когда на выборочные данные накладывалась помеха  $x_i^{ПОМ} = x_i + \xi_i$  ( $i = \overline{1; N}$ ), причем закон распределения случайной помехи  $F(\xi)$  являлся нормальным с нулевым математическим ожиданием, а среднее квадратическое отклонение  $\sigma_\xi$  (масштаб помехи) формировался по правилу  $\sigma_\xi = \alpha \cdot \sigma_x$ , где  $\sigma_x$  – среднее квадратическое отклонение, соответствующее  $F(x)$ . Коэффициент  $\alpha$  в ходе исследований принимал значения 0; 0.1; 0.25; 0.5; 0.75; 1.

Было установлено, что с ростом  $\alpha$  для  $\hat{\Phi}_N(x_1^{ПОМ})$ ,  $\hat{\Phi}_N(x_N^{ПОМ})$  происходит увеличение величины смещения доверительных областей относительно истинных законов распределения  $\Phi_N(x_1)$ ,  $\Phi_N(x_N)$  (рис. 6). Здесь  $\hat{\Phi}_N(x_1^{ПОМ})$ ,  $\hat{\Phi}_N(x_N^{ПОМ})$  – оценки законов распределения первого и  $N$ -го элементов ранжированной выборки.

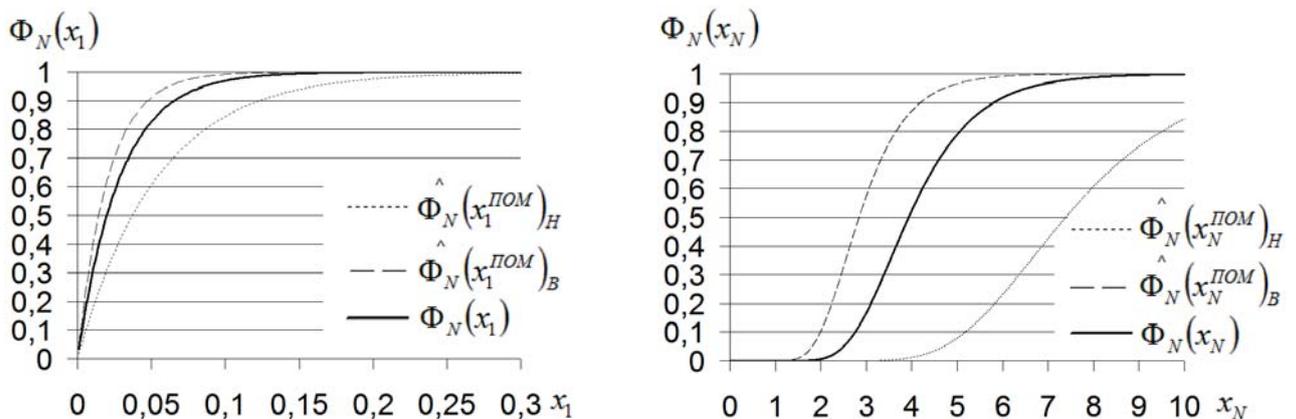


Рисунок 6 – Положение  $\Phi_N(x_1)$ ,  $\Phi_N(x_N)$  внутри доверительной области при показательном  $F(x)$ ;  $\alpha = 0.5$ ;  $N = 35$

Были установлены допустимые ограничения на точность регистрации элементов выборки, при которых оценку граничных значений характеристик надежности целесообразно осуществлять с использованием унифицированных моделей законов распределения случайных величин.

Приведены результаты исследования влияния погрешностей регистрации исходных данных на точность оценивания законов распределения крайних порядковых статистик  $\Phi_N(x_1)$ ,  $\Phi_N(x_N)$ . Были получены зависимости максимальной ширины доверительных областей  $D_N(x_1)$ ,  $D_N(x_N)$  от объема выборки при разных значениях коэффициента  $\alpha$  (рис. 7). В качестве характеристики точности оце-

нивания  $\hat{\Phi}_N(x_1^{ПОМ})$ ,  $\hat{\Phi}_N(x_N^{ПОМ})$  по выборке  $x_i^{ПОМ}$  ( $i = \overline{1; N}$ ) принималась максимальная ширина доверительного интервала.

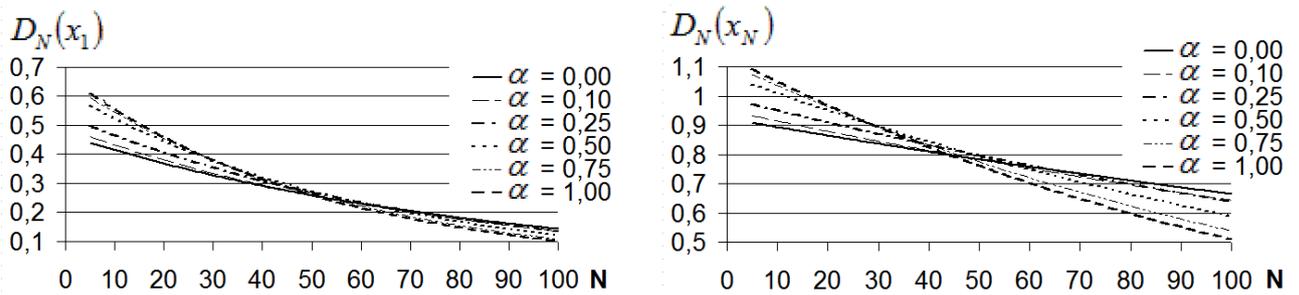


Рисунок 7 – Зависимости максимальной ширины доверительных границ минимальной (слева) и максимальной (справа) порядковых статистик от объема выборки  $N$  при различных значениях помехи  $\alpha$

Полученные результаты позволяют сделать заключение о том, что до определенного значения  $\alpha$  низкую точность регистрации данных при оценивании граничных значений характеристик надежности можно скомпенсировать за счет увеличения объема выборки. И наоборот, можно получать ту же самую точность оценивания при меньших  $N$  за счет уменьшения  $\alpha$ , то есть за счет повышения точности регистрации данных. Однако при  $\alpha \geq 1$  систематическая погрешность оценивания начинает превалировать над случайной. Это выражается в том, что  $F_T(x)$ , которой соответствовала исходная выборка  $x_i$  ( $i = \overline{1; N}$ ), оказывается вне границ доверительной области, которые оценивались по  $x_i^{ПОМ}$  ( $i = \overline{1; N}$ ). При этом с увеличением  $N$  границы доверительной области сужались.

Основу решения второй задачи, связанной с исследованием статистических свойств оценок  $\hat{\Phi}_N(x_1)$  внутри доверительной области, составляет анализ значений  $\hat{\Phi}_N^{(j)}(x_{1,k}^*)$ , соответствующих значениям  $\hat{\Phi}_N(x_1)$  в  $j$ -й реализации вычислительного эксперимента ( $j = \overline{1; \eta}$ ) при фиксированных значениях  $x_1^*$  в  $k$ -х сечениях ( $k = 1, 2, \dots$ ). Для построения оценок функций распределения  $f^{(\beta)}\left(\hat{\Phi}_N^{(j)}(x_{1,k}^*)\right)$  использовалась унифицированная модель, основанная на формализме Джейнса. Здесь верхний индекс ( $\beta$ ) подчеркивает то обстоятельство, что число повторений эксперимента  $\eta$  выбиралось с учетом выбранной доверительной вероятности  $\beta$ .

Полученные результаты позволяют заключить, что статистические свойства оценок, соответствующих разным сечениям, зависят, во-первых, от удаленности рассматриваемого сечения от математического ожидания закона распределения минимальной порядковой статистики и, во-вторых – от объема выборочных данных. Было установлено, что левее математического ожидания распределения граничных значений характеристик надежности имеют положительную асимметрию, причем асимметрия тем больше, чем дальше от математического ожидания расположено временное сечение. Правее от математического ожидания асимметрия отрицательная, причем тем больше, чем дальше от математического ожидания расположено временное сечение.

Таким образом, оценка закона распределения минимальной порядковой статистики в начальный период времени дает заниженную оценку значений характеристик надежности. При продолжительной же эксплуатации изделий – наоборот, оценка граничных значений характеристик надежности оказывается завышенной. На рис. 8, 9 показаны зависимости средних величин абсолютного  $\mu(\Delta_x)$  и относительного  $\mu(\sigma_x)$  смещения оценок закона распределения минимальной порядковой статистики относительно теоретической функции распределения  $\Phi_N^{(T)}(x_1)$  от продолжительности эксплуатации и объема выборочных данных, рассчитанные с использованием метрики доминирования.

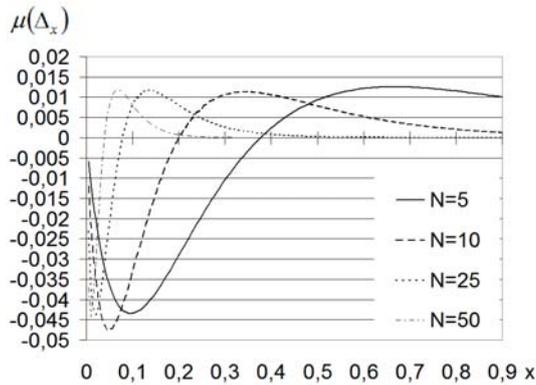


Рисунок 8 – Среднее абсолютное смещение оценок граничных значений характеристик надежности

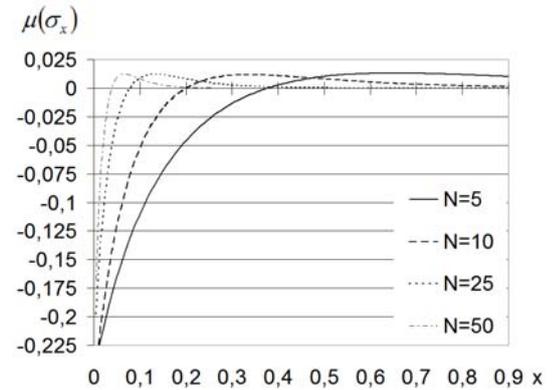


Рисунок 9 – Среднее относительное смещение оценок граничных значений характеристик надежности

Было установлено, что величина смещения оценок граничных значений характеристик надежности при использовании метрики доминирования практически не зависит от объема выборки, однако значение случайного аргумента, при котором достигается наибольшее смещение, при увеличении объема выборки сдвигается к началу координат. Анализ тех же данных с использованием евклидовой метрики показал, что величина смещения оценок граничных значений характеристик надежности зависит от объема выборочных данных – увеличение количества данных об отказах приводит к уменьшению величины смещения.

Была исследована неопределенность, соответствующая оценкам граничных значений характеристик надежности в разных сечениях  $x_{1,k}^*$ . Для этого были рассчитаны значения энтропии по Шеннону:

$$H_1^{(\beta)}(x_{1,k}^*) = - \int_{x_{\min}^{(x_{1,k}^*)}}^{x_{\max}^{(x_{1,k}^*)}} f^{(\beta)}\left(\hat{\Phi}_N(x_{1,k}^*)\right) \cdot \log f^{(\beta)}\left(\hat{\Phi}_N(x_{1,k}^*)\right) d\left(\hat{\Phi}_N(x_{1,k}^*)\right),$$

где  $x_{\min}^{(x_{1,k}^*)}$ ,  $x_{\max}^{(x_{1,k}^*)}$  – нижняя и верхняя границы доверительной области (доверительный интервал), соответствующие  $k$ -му сечению  $x_{1,k}^*$ . Отметим, что  $x_{\min}^{(x_{1,k}^*)}$ ,  $x_{\max}^{(x_{1,k}^*)}$  также зависят от числа повторений эксперимента  $\eta$ , то есть от значения  $\beta$ ;  $f^{(\beta)}\left(\hat{\Phi}_N(x_{1,k}^*)\right)$  – оценка плотности распределения по выборочным значениям  $\hat{\Phi}_N(x_{1,k}^*)$  в  $k$ -м сечении  $x_{1,k}^*$ .

Значения  $H_1^{(\beta)}(x_{1,k}^*)$  сравнивались со значениями  $H_2^{(\beta)}(x_{1,k}^*)$ , где  $H_2^{(\beta)}(x_{1,k}^*)$  рассчитывалось по формуле  $H_2^{(\beta)}(x_{1,k}^*) = \log(x_{\max}^{(x_{1,k}^*)} - x_{\min}^{(x_{1,k}^*)})$  и соответствует значению энтропии, получаемой при учете лишь границ доверительного интервала  $D^{(\beta)}(x_{1,k}^*) = x_{\max}^{(x_{1,k}^*)} - x_{\min}^{(x_{1,k}^*)}$ .

Относительное значение дополнительной информации, получаемой за счет учета особенностей  $f^{(\beta)}(\hat{\Phi}_N(x_{1,k}^*))$  по сравнению с равномерным распределением (что соответствует интервальному оцениванию граничных значений характеристик надежности при выбранной  $\beta$ ) определяется соотношением

$$\Delta I^{(\beta)}(x_1) = \frac{H_2^{(\beta)}(x_{1,k}^*) - H_1^{(\beta)}(x_{1,k}^*)}{H_2^{(\beta)}(x_{1,k}^*)}$$

На рис. 10, 11 приведены зависимости ширины доверительного интервала  $D^{(\beta)}(x_1)$  и  $\Delta I^{(\beta)}(x_1)$ , соответствующие показательному закону распределения  $F(x)$  и значению  $\beta = 0.95$ .

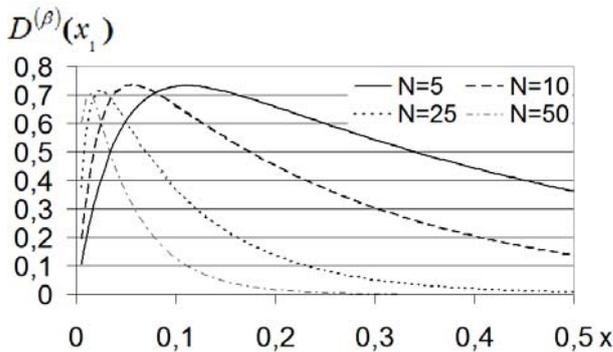


Рисунок 10 – Ширина доверительного интервала

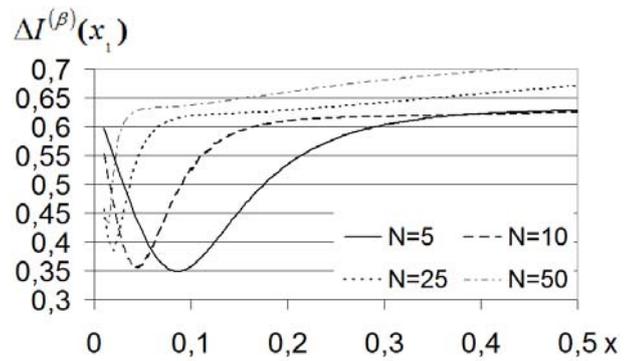


Рисунок 11 – Относительное значение дополнительной информации

Полученные результаты позволяют заключить, что наибольшая неопределенность оценки граничных значений характеристик надежности при показательном законе распределения наработки до отказа наблюдается в области математического ожидания минимальной порядковой статистики. Абсолютная величина неопределенности практически не зависит от объема выборки, однако, с увеличением числа данных об отказах значение  $x_{1,k}^*$ , в котором значение  $\Delta I^{(\beta)}(x_1)$  наибольшее, смещается к началу координат.

Проведенные исследования позволяют заключить, что учет статистических особенностей оценок граничных значений характеристик надежности позволяет, по сравнению с интервальным оцениванием, дополнительно получать от 35 до 70 процентов информации относительно характеристик надежности.

**Четвертая глава** посвящена разработке инженерных методик, основанных на полученных в ходе проводившихся исследований теоретических результатах, и реализующему их прототипу программного продукта.

Приводится описание инженерной методики точечного и доверительного оценивания граничных значений характеристик надежности, позволяющей получать оценки граничных значений характеристик надежности, в том числе, при малом числе исходных данных. Отличием инженерной методики является

использование номограмм, характеризующих зависимость статистических моментов законов распределения крайних порядковых статистик от статистических моментов теоретического закона распределения наработки до отказа, а также то, что она позволяет учитывать зависимость статистических свойств оценок граничных значений характеристик надежности от особенностей исходных данных и продолжительности эксплуатации изделий.

Для показательного закона распределения наработки до отказа приводится описание инженерной методики сокращения продолжительности испытаний или длительности подконтрольной эксплуатации электронных модулей радиоэлектронных средств при заданных требованиях по надежности. Показано, что разработанная методика в случае показательного закона распределения наработки до отказа позволяет сократить продолжительность проведения испытания или время подконтрольной эксплуатации не менее чем на 30 процентов по сравнению с традиционным подходом. Предложенный подход может быть также использован на этапе разработки при планировании запасов в комплектах ЗИП.

Приводится описание прототипа программного продукта, реализующего разработанные методики. Данный программный продукт согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 12182-2002 соответствует классу распространяемых систем.

Приводятся результаты обработки полученных в результате проведения подконтрольной эксплуатации данных об отказах электронных модулей станции коммутации и каналообразования, входящей в состав автоматизированной цифровой сети связи повышенной живучести. Результаты оценивания позволили подтвердить соответствие выпускаемых изделий заданным требованиям по надежности, в том числе «в худшем случае».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана комбинированная модель оценивания граничных значений характеристик надежности, основанная на использовании результатов анализа зависимости сходимости и устойчивости статистических характеристик крайних порядковых статистик от свойств выборочных данных. Отличие от известных методов заключается в построении комбинированного закона распределения наработки до отказа за счет объединения разных параметрических моделей законов распределения непрерывных случайных величин и выработке решающего правила относительно схемы расчета в зависимости от объема исходных данных. Установлено, что для законов распределения непрерывных случайных величин, для которых справедливо ограничение  $0 \leq X < \infty$ , независимо от типа  $F(x)$ , при объеме выборки  $N \leq 10$  более достоверные результаты оценивания получаются при использовании модели, основанной на формализме Джейнса, а при  $N \geq 10$  – на основе закона распределения Эрланга. Использование комбинированной модели позволяет полностью формализовать процедуру оценивания граничных значений характеристик надежности, в том числе, при малом числе исходных данных, а также в случае, когда тип закона распределения наработки до отказа заранее неизвестен.

2. Разработан алгоритм оценивания граничных значений характеристик надежности, основанный на зависимостях статистических моментов законов распределения крайних порядковых статистик от соответствующих моментов исходного закона распределения наработки до отказа. Предложенный алгоритм отличается от известных тем, что его использование не требует выдвижения гипотез о типе закона распределения наработки до отказа и позволяет получать оценки граничных значений характеристик надежности по значениям лишь первых двух статистических моментов, определяемых по выборочным данным. Это позволяет упростить вычислительную процедуру и повысить точность оценивания граничных значений характеристик надежности, в том числе, по выборкам малого объема, а также в случае, когда тип закона распределения заранее неизвестен.

3. Установлены закономерности смещения оценок законов распределения граничных значений характеристик надежности, основанные на результатах исследования зависимости статистических свойств интервальных оценок граничных значений характеристик надежности от объема выборочных данных, точности их регистрации и продолжительности эксплуатации изделий. Установлено, что в отличие от оценок, построенных в области средней наработки до отказа, оценки граничных значений характеристик надежности, получаемые на начальных и конечных этапах эксплуатации электронных модулей радиоэлектронных средств, дают более достоверные результаты. Для показательного закона распределения случайной величины, выявленные закономерности позволяют сократить неопределенность оценивания граничных значений характеристик надежности от 35 до 70 процентов по сравнению с использованием интервальных оценок.

4. Разработана инженерная методика оценивания граничных значений характеристик надежности электронных модулей радиоэлектронных средств для случая малого числа выборочных данных, в том числе, когда тип закона распределения наработки до отказа заранее неизвестен. Методика позволяет учитывать зависимость статистических свойств оценок граничных значений характеристик надежности от особенностей исходных данных и продолжительности эксплуатации изделий. Разработана инженерная методика, позволяющая при заданных требованиях по надежности сократить продолжительность проведения испытания или время подконтрольной эксплуатации электронных модулей радиоэлектронных средств не менее чем на 30 процентов по сравнению с традиционным подходом. Предложенный подход может быть также использован на этапе разработки при планировании запасов в комплексах ЗИП.

На основе разработанных методик реализован прототип программного продукта, позволяющий автоматизировать использование разработанных инженерных методик, что делает возможным его использование специалистами, детально не знакомыми с особенностями аппарата порядковых статистик. Приводятся результаты обработки данных об отказах электронных модулей станции коммутации и каналообразования сетей связи, полученных в результате подконтрольной эксплуатации.

**ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ*****В рецензируемых журналах из списка ВАК***

1. Анализ надежности технических систем на основе математико-статистического моделирования / В. Е. Гвоздев, Г. И. Таназлы, А. Ю. Хасанов, М. А. Абдрафиков // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». 2011. Т. 15, № 2 (42). С. 22–29.

2. Оценивание граничных значений характеристик надежности радиоэлектронных функциональных узлов систем коммутации по данным подконтрольной эксплуатации / В. Е. Гвоздев, М. А. Абдрафиков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». 2012. № 5 (157). С. 71–77.

***В других изданиях***

3. Обработка данных об отказах агрегатов технических систем на основе порядковых статистик / М. А. Абдрафиков // Мавлютовские чтения: всеросс. молодежн. науч. конф.: сб. тр. Уфа: УГАТУ, 2009. Т. 3. С. 241.

4. Место статистического моделирования в управлении надежностью технических объектов / В. Е. Гвоздев, Г. И. Таназлы, А. Ю. Хасанов, М. А. Абдрафиков // Материалы 12-го междунар. сем. по информатике и информационным технологиям. Москва – Санкт-Петербург, 2010. Т. 3. С. 28–30. (Статья на англ. языке)

5. Анализ точности оценивания законов распределения порядковых статистик в зависимости от объема и точности исходных данных / А. Ю. Хасанов, М. А. Абдрафиков, К. Б. Ахуньянова // Мавлютовские чтения: всеросс. молодежн. науч. конф.: сб. тр. Уфа: УГАТУ, 2011. Т.3. С. 218–219.

6. Анализ информативности выборочных данных на основе аппарата порядковых статистик / М. А. Абдрафиков // Актуальные проблемы науки и техники: сб. тр. 5-й Всеросс. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2010. Т. 2. С. 9–12.

7. Анализ точности и эффективности оценивания законов распределения крайних порядковых статистик в зависимости от объема и точности регистрации исходных данных / М. А. Абдрафиков // Актуальные проблемы науки и техники: сб. тр. 6-й Всеросс. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 259–263.

8. Интервальное оценивание граничных значений характеристик надежности технических объектов / В. Е. Гвоздев, М. А. Абдрафиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: XIII Международная конф.: тр. конф. Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. С. 153–158.

9. Метод оценивания крайних значений характеристик надежности при малом числе опытных данных / М. А. Абдрафиков // Актуальные проблемы науки и техники: сб. тр. 7-й Всеросс. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2012. С. 246–249.

АБДРАФИКОВ Михаил Асхатович

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ  
НА ОСНОВЕ АППАРАТА ПОРЯДКОВЫХ СТАТИСТИК  
(на примере блоков станции коммутации  
и каналообразования сетей связи)

Специальность 05.13.01  
Системный анализ, управление и обработка информации  
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук