

Продолжение титульного листа ВКР по теме «Методика применения гистограммных вычислений для оценки вероятности безотказной работы компонентов космического аппарата»

Консультанты по
разделам:

Исследование предметной области и
постановка задачи

Наименование раздела

подпись, дата

В.И. Кудымов
инициалы, фамилия

Общие сведения о
численном вероятностном анализе

Наименование раздела

подпись, дата

Б.С. Добронев
инициалы, фамилия

Организация и обработка результатов
вычислительного эксперимента

Наименование раздела

подпись, дата

Б.С. Добронев
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

Сидорова Е.А.
инициалы, фамилия

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2016 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту Углеву Виктору Александровичу

Группа 14-01-3М

Направление (специальность) 27.04.03 «Системный анализ и управление»

Тема выпускной квалификационной работы «Методика применения гистограммных вычислений для оценки вероятности безотказной работы компонентов космического аппарата»

Утверждена приказом по университету № _____ от _____

Руководитель ВКР Кудымов Владимир Иванович, профессор, д.т.н. МБК ПФКТ СФУ.

Исходные данные для ВКР: статистика о потоке отказов бортового оборудования навигационных космических аппаратов; методика оценки вероятности безотказной работы по ГОСТ 27002-89.

Перечень рассматриваемых вопросов (разделов ВКР) Исследование предметной области, разработка методики оценки вероятности безотказной работы космического аппарата по малому объёму потока отказов, апробация методики на примере аппаратуры космического аппарата, выработка рекомендаций.

Перечень графического или иллюстративного материала с указанием основных чертежей, плакатов:

- Слайд 1: «Тема: Методика применения гистограммных вычислений для оценки вероятности безотказной работы компонентов космического аппарата»;
- Слайд 2: «Оценка надёжности СТО (сложных технических систем)»;
- Слайд 3: «Технические системы ответственного назначения (ТСОН) и их специфика»;
- Слайд 4: «Малые выборки и цензурирование потока отказов»;
- Слайд 5: «Эпистемическая неопределённость и её роль при расчёте показателей надёжности»;
- Слайд 6: «Существующие подходы и их недостатки»;
- Слайд 7: «Численный вероятностный анализ и гистограммы»;

- Слайд 8: «Цели и задачи исследования»;
- Слайд 9, 10: «Общая схема расчёта значения ВБР по малому объёму данных о потоке отказов (на примере значения вероятности безотказной работы - ВБР)»;
- Слайд 11-16: «Этапы 1-6 методики расчёта показателей надёжности по малому объёму данных о потоке отказов с применением гистограммных вычислений»;
- Слайд 17-19: «Пример расчёта для компонентов КА»;
- Слайд 20: «Рекомендации по применению методики»;
- Слайд 21: «Научная новизна и практическая значимость»;
- Слайд 22: «Выводы».

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК

Наименование и содержание этапа (раздела)	Срок выполнения
1 Определение плана работы над НИР	10/09/2015 – 20/09/2015
2. Анализ предметной области исследования	20/09/2015-30/01/2015
3 Постановка задачи	01/02/2016-10/02/2016
4 Описание математической модели средствами численного вероятностного анализа	01/01/2016-201/01/2016
5 Разработка методики оценки показателя ВБР по малой статистике отказов	21/01/2016-01/02/2016
6 Апробация методики на примере статистики отказов бортового оборудования космического аппарата	02/02/2016-02/03/2016
7 Доказательство адекватности методики	03/03/2016-03/04/2016
8 Выработка рекомендаций	03/04/2016-20/04/2016
9 Оформление основной части, подготовка иллюстративного материала	21/04/2016-25/06/2016
10 Защита с представлением готового материала	27/06/2016

« ___ » _____ 20__ г.

Руководитель ВКР

подпись, дата

Кудымов В.И.

инициалы, фамилия

Задание приняла к исполнению

подпись, дата

В.А. Углев

инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Методика применения гистограммных вычислений для оценки вероятности безотказной работы компонентов космического аппарата» содержит 52 страницы текстового документа, список литературы из 33 использованных источников.

НАДЕЖНОСТЬ, ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ, СТАТИСТИКА (ПОТОК) ОТКАЗОВ, КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ЧИСЛЕННЫЙ ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ, ГИСТОГРАММНАЯ АРИФМЕТИКА.

Целью работы является разработка методики применения гистограммных вычислений для оценки вероятности безотказной работы компонентов космического аппарата. Основные задачи:

1 Осуществить обзор предметной области и выявить сложности оценки зачений показателей надёжности для технических систем ответственного назначения, имеющих малый объём данных о потоке отказов;

2 Разработать методику сбора, обработки, вычислений и интерпретации показателей надёжности по малой статистике отказов, опирающуюся на численный вероятностный анализ, но не противоречащую действующим требованиям ГОСТ 27002-89;

3 Провести вычислительный эксперимент для подтверждения методики на данных о потоке отказов объектов ракетно-космической отрасли (на примере компонентов бортового оборудования космического аппарата);

4 Разработать рекомендации по применению методики оценки показателей надёжности по малой статистике отказов.

В результате исследования была получена методика и сформулирован ряд рекомендаций, позволяющих осуществлять оценку вероятности безотказной работы при малом объёме статистики отказов.

THE ABSTRACT

Master thesis on the topic "the Methodology of application of histogram computation for estimating the probability of failure-free operation of the components of the spacecraft contains 52 pages of a text document and used source 33.

RELIABILITY, PROBABILITY OF FAILURE, STATISTICS (THE FLOW) BOUNCE, SPACECRAFT, NUMERICAL PROBABILISTIC ANALYSIS, HISTOGRAM ARITHMETIC.

The aim of this work is to develop methods of application of histogram computation for estimating the probability of failure-free operation of the components of the spacecraft. Main tasks:

1 To provide an overview of the subject area and to identify the complexity of assessment of sachani of reliability for technical systems for critical applications, which has a small amount of data on the flow of failures;

2 To develop a methodology for collecting, processing, computation and interpretation of reliability indices for low statistics of failure based on numerical probabilistic analysis, but not conflicting with the applicable GOST 27002-89;

3 To test the methodology on data about the flow of failures of objects of rocket and space industry (for example, components on-Board equipment of the spacecraft);

4 To develop recommendations for application of methods of reliability assessment for low statistics of failure.

The study was received, the methodology and formulated a number of recommendations, which allows to assess the probability of failure-free operation with a small amount of failure statistics.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	11
1 Анализ проблемы оценки показателей надёжности по малой статистике отказов	12
1.1 Надёжность в технических системах ответственного назначения (ТСОН)	12
1.1.1 Неопределённость в задаче оценки показателей надёжности.....	15
1.1.2 Подходы к оценке показателей надёжности, опираясь на статистику отказов	17
1.1.3 Специфика оценки показателей надёжности для ТСОН	19
1.2 Проблема снижения точности расчётов показателей надёжности по малой статистике отказов	20
1.3 Численный вероятностный анализ (ЧВА)	23
1.4 Постановка исследовательской задачи	25
1.5 Выводы по главе.....	27
2. Методика повышения точности оценки показателей надёжности с применением ЧВА.....	29
2.1 Требования к методике оценки показателей надёжности по малой статистике отказов	29
2.2 Представление статистики потока отказов в виде гистограммы.....	30
2.3 Методика уточнения расчёта показателей надёжности по малой статистике отказов	31
2.4 Выводы по главе.....	333
3 Апробация методики при оценке показателей надёжности бортового оборудования спутника навигации (изъята из общего доступа)	35
Заключение	36
Список сокращений	38
Список использованных источников	39

ВВЕДЕНИЕ

Теория надёжности – сравнительно новая и вместе с тем достаточно чётка регламентированная область инженерных расчётов. Её применяют для различных по масштабу компонентов искусственных технических систем: начиная от отдельно взятых элементов радиоэлектронной промышленности и оканчивая группировками космических аппаратов. Не смотря на это, в теории надёжности остаётся целый ряд фундаментальных проблем, связанных с выполнением расчётов различных показателей надёжности. Одной из них является повышение достоверности и обоснованности вычислений, в условиях, когда нет достаточного объёма исходных данных для оценки вероятностных характеристик потока отказов. Исследованию данного вопроса и посвящено данное исследование.

Первая глава диссертации направлена на выявление причин снижения достоверности расчётов при малом объеме данных о потоке отказов, а так же на рассмотрение существующих методов её преодоления при организации вычислений. В ней даётся краткий обзор численного вероятностного анализа, оперирующего гистограммными вычислениями, а так же осуществляется постановка задачи.

Во второй главе выявляются требования и разрабатывается методика применения гистограммных вычислений для оценки вероятности безотказной работы. Приводится подробное описание всех этапов её проведения, согласовывая их с требованиями ГОСТ 27002-89.

Третья глава посвящена экспериментальной апробации предложенной методики на примере компонентов бортового оборудования навигационного космического аппарата в результате проведения лётных испытаний и штатной эксплуатации. Осуществляется сравнительный анализ с традиционным подходом к оценке показателей надёжности, а так же даётся ряд рекомендаций по применению методики на предприятиях ракетно-космической отрасли.

1 Анализ проблемы оценки показателей надёжности по малой статистике отказов

1.1 Надёжность в технических системах ответственного назначения (ТСОН)

При определении надёжности сложного технического объекта (СТО), независимо от типа, конструкции, условий работы и назначения. В соответствии с ГОСТ 27002-89 *надёжность* – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования [19]. Такое определение принято называть *параметрическим*.

В международной практике надёжность часто связывают с *готовностью* (availability) объекта выполнять требуемые функции при заданных условиях в произвольный момент времени [19]. В отечественных нормативных документах надёжность трактуется как сложное свойство, включающее в себя более простые свойства объекта, которые называются *сторонами надёжности*. К ним относятся безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

В тех случаях, когда необходимо спроектировать СТО с повышенными требованиями к показателям надёжности, говорят о технических системах ответственного назначения (ТСОН). К ним можно отнести медицинское оборудование, вооружения, продукцию ракетно-космической и атомной отраслей и пр.

Одним из центральных понятий теории надёжности является *отказ* – событие, заключающееся в утрате объектом работоспособности, т.е. способности выполнять требуемые функции. С другой стороны, отказ трактуется, как событие, после возникновения которого характеристики технического объекта (параметры) выходят за допустимые пределы [27]. Это

понятие субъективно, т.к. допуск на параметры объекта устанавливает пользователь.

Отказы объектов СТО могут быть разных видов и классифицируются по различным признакам, например, как представлено на рисунке 1.1. Классификация отказов по последствиям устанавливается по согласованию между заказчиком и разработчиком (изготовителем) СТО.



Рисунок 1.1 – Признаки классификации отказов технических объектов

Среди характеристик надежности технических объектов различаются показатели состояния, критерии и показатели надежности, определяющие в конечном итоге три подхода к решению задачи надежности. Первый базируется на анализе состояний объекта. При втором подходе используется метод предельных состояний. При третьем – осуществляется вероятностная оценка показателей надежности как вероятностей реализации соответствующих событий и состояний в зависимости от установленных критериев надежности. Исторически и логически эти подходы тесно увязаны между собой, что наглядно показано на рисунке 1.2 [6].

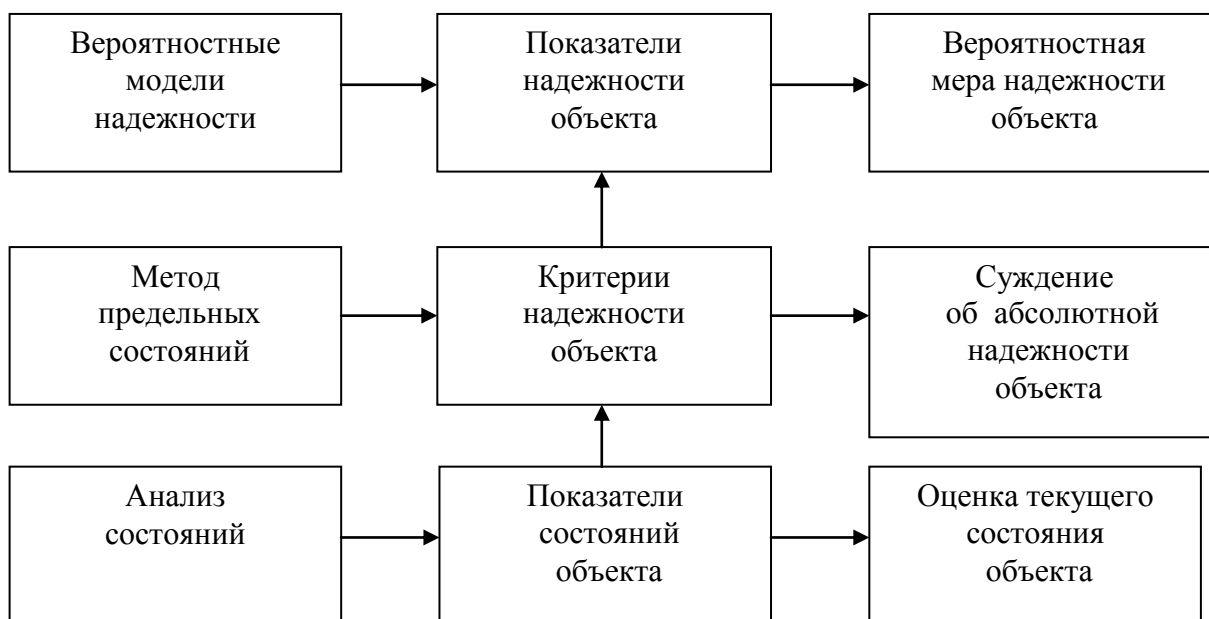


Рисунок 1.2 – Связи между подходами к оценке надежности технических объектов

Анализ состояний объекта, по сути сводится к сопоставлению фактических значений диагностических параметров/признаков с некоторыми контрольными значениями, характеризующими регламентируемые состояния объекта в заданный момент времени. Основное преимущество такого подхода – оперативность контроля, что особенно важно при оценке надежности эксплуатируемых объектов.

При анализе состояний технических объектов в качестве диагностических моделей могут использоваться системы алгебраических и дифференциальных уравнений, имитационные и логические соотношения, функциональные, структурные, регрессионные модели и др. выбор модели определяется конкретными условиями диагностирования и возможностями получения требуемой информации. В общем случае распознавание состояния СТО может рассматриваться как вероятностная процедура, так как при этом изначально приходится иметь дело с множеством возможных состояний, и вероятность нахождения объекта в любом из них в принципе не исключается. Основным

недостатком анализа состояний является принципиальная невозможность установить резервы надежности объекта.

Вероятностная оценка показателей надежности опирается на экспериментальные данные и прецеденты отказов оцениваемых СТО. Наиболее часто используются следующие показатели надежности: вероятность безотказной работы, вероятность отказа, средняя наработка на отказ, интенсивность отказов и т.д. Наиболее существенным недостатком вероятностной оценки является необходимость знания вероятностных оценок, заданных априори или рассчитанных по достаточному объёму статистических данных об отказах (фактическом потоке отказов) [30]. Поэтому рассмотрим специфику вероятностной оценки подробнее.

1.1.1 Неопределённость в задаче оценки показателей надёжности

Для численного моделирования систем в условиях неопределенности используют различные методы, в том числе подходы, основанные на описании законов распределения случайных величин. В том случае, когда класс, к которому принадлежит искомое распределение (с точностью до численных значений конечного числа параметров) неизвестен, для восстановления распределения используют непараметрические методы [17].

Практика решения подобных задач показывает, что выбор соответствующего метода вероятностного описания системы должен обязательно учитывать характер и тип неопределенности. Анализ публикаций показал, что необходимо различать общее понятие неопределенности (common uncertainty), выделив из нее две важные составляющие, а именно, элиторную (aleatory) и эпистемистическую (epistemic) [32].

Элиторная неопределённость является неотъемлемым атрибутом случайных событий и характеризуется присущей поведению систем случайностью, которая может быть представлена частотными функциями распределения. Альтернативная терминология для элиторной

неопределенности включает такие понятия как изменчивость, стохастическая неопределенность, «объективная» неопределенность или неопределенность типа А. Теория вероятностей предназначена для моделирования, оценки и оперирования именно с элитерными неопределённостями, когда имеется возможность оперировать с повторными выборками [17].

В свою очередь, неопределённость самих вероятностных оценок называют эпистемической неопределённостью (epistemic uncertainty). Эпистемическая неопределённость прямо связана с объёмом и достоверностью информации, на основании которой получаются эти оценки, характеризуется состоянием отсутствия знаний об изучаемом объекте, о предыстории рассматриваемого процесса, невозможностью использовать повторные выборки.

Одним из факторов, влияющих на качество исследований показателей надёжности СТО является уровень неопределенности информации. Уровень неопределенности информации определяет различные подходы и методы. Выделяют уровни и типы неопределенностей. Можно выделить три типа «неопределенных» данных: случайные, нечеткие и интервальные. Случайные числа задаются некоторыми вероятностными распределениями их возможных значений, нечеткие данные задаются лингвистическими переменными и их функциями принадлежности [16], интервальные данные задаются интервалами их возможных значений без указания какого-либо распределения возможных значений внутри заданного интервала.

Арифметика неопределенностей представляет собой подход, который является способом представления неопределенности в зависимости от типа, объема и особенностей информации, которые могут быть использованы при решении практических задач, а также методы, суть которых состоит в осуществлении последующих расчетов таким образом, чтобы получить наиболее правдоподобные результаты, не внося, по возможности, дополнительных неопределенностей. Поэтому разработаны и применяются

арифметики, базирующиеся и на случайных (вероятностных) оценках [7], и на нечётких множествах [16], и на интервальных оценках [4].

На этом основании можно отметить, что повышение точности расчётов показателей надёжности достижимо за счёт:

- Расширения знаний о СТО и её отказах, привлекая богатую статистику о потоке отказов (источниками могут быть реальные прецеденты, анализ отказов схожих систем, а так же результаты моделирования);
- Применение более точных и надёжных методов расчёта, учитывающих и, по возможности, снижающих вклад погрешностей в технологию расчётов.

Традиционная теория надёжности опирается на первый подход, практически игнорируя второй. Следует разобраться, достаточно ли для этого оснований.

1.1.2 Подходы к оценке показателей надёжности, опираясь на статистику отказов

Исследуя показатели надёжности СТО, особенно на этапе их проектирования, очень важно опираться на достоверные и надёжные источники информации об отказах. На их основании можно оценить вероятность безотказной работы для требуемого интервала времени, опираясь на имеющиеся данные об интенсивности отказов. Введём ряд определений [12].

Вероятность безотказной работы (ВБР) $P(t)$ — вероятность того, что в пределах заданного времени отказ не возникает, оценивается по (1).

$$P(t) = P(T \geq t), \tag{1}$$

где t — случайное время работы объекта до отказа; T — заданное время.

Этот показатель обладает следующими свойствами: $P(t)=1$, т. е. до начала работы ($t=0$) система была безусловно работоспособной; $P(t)$ — невозрастающая функция времени; объект не может сохранять свою работоспособность неограниченно долго.

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. Для технических систем, она рассчитывается по формуле (2).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{P'(t)}{P(t)}. \quad (2)$$

Интенсивность отказов показывает, какая часть элементов выходит из строя в единицу времени по отношению к среднему числу исправно работающих элементов.

Согласно центральной предельной теореме [7], показатели $P(t)$ и $\lambda(t)$ должны иметь в своей основе значительную статистику эмпирических данных, обеспечивающую надёжность расчёта вероятностных показателей. Если статистических данных достаточно много, то дальнейшая оценка показателей надёжности лежит в плоскости работы с элиторной неопределённостью. В противном случае будет наблюдаться необходимость сбора достаточного объёма статистических данных для правомерности оперирования вероятностями. Как следствие, будет необходимо сначала преодолеть эпистемистическую неопределённость и, если этого сделать не удастся, оперировать методами расчёта показателями надёжности, отличными от традиционных.

1.1.3 Специфика оценки показателей надёжности для ТСОИ

Существуют некоторые трудности оценки показателей надёжности из-за недостаточной накопленной статистики об отказах в течение срока всего существования. Причинами сложности накопления статистики для ТСОИ являются следующие факторы [3]:

- отсутствие поточного производства, когда выпускается малая партия изделий или каждый раз проектируются уникальные ТСОИ;
- срок активного существования таких систем слишком большой и полученная статистика может быть неактуальна для новых видов аппаратуры с более жесткими требованиями к функционированию и надёжности;
- невозможным получение адекватной статистики об отказах элементов ТСОИ после ввода её экземпляров в эксплуатацию, включая необходимость осуществления цензурирования отказов [11];
- отсутствие статистики отказов для уникальных экспериментальных решений (особенно актуально для продукции, претендующей на роль импортозамещающей);
- отечественные и зарубежные производители комплектующих ТСОИ обычно ведут закрытый вид деятельности и их наработки в области надёжности являются информацией для служебного пользования (это объясняется наличием жесткой конкуренции предприятий производителей и спецификой разработок ответственного назначения).

Кроме того, теория надёжности является достаточно консервативной областью инженерных знаний, давно «застывшая» в комплекте ГОСТов, многие из которых уже морально устаревают, но обязательны к исполнению при проектировании и разработке ТСОИ. Не смотря на это, указанные причины приводят к выводу, что во многих проектах СТО, относящихся к ТСОИ, при расчёте показателей надёжности необходимо учитывать эпистемическую

неопределённость и, как следствие, корректировать методы работы с элиторной неопределённостью.

1.2 Проблема снижения точности расчётов показателей надёжности по малой статистике отказов

Методы расчётов, лежащие в основе теории надёжности, как было показано выше, базируются на допущении, что статистики отказов достаточно, чтобы рассчитать ВБР и прочие показатели надёжности [10]. Для ТСОН, имеющих, как правило, структуру высокой сложности и специально введённые в неё резервные элементы (комплекты), расчёт показателей надёжности осуществляется в автоматическом режиме (с применением специализированного программного обеспечения). Исходя из этого можно выделить два больших класса источников погрешности, не относящихся непосредственно к эпистемической природе исходных данных – это методические и операционные (вычислительные).

К *методическим источникам*, влияющим на снижение точности (повышение погрешности) относятся следующие:

1 Каким способом будет осуществляться обобщение (целенаправленное сокращение многообразия) статистических данных о потоке отказов. Можно выделить различные виды обобщений: расчёт средних значений (среднее арифметическое, среднее геометрическое, среднее взвешенное, среднее по Колмогорову и пр.) [18]. При любом способе, будет осуществляться потеря части исходных данных и возрастет погрешность результатов расчётов.

2 В какой форме будут представлены статистические данные о потоке отказов. Отметим четыре базовых вида:

– Точка (одно число) – вероятностная мера, редуцирующая всё богатство поведения процесса к единственному наиболее вероятному исходу. Данная форма применяется при допущениях, что процесс имеет только один благоприятный исход и его частота довольно точно определена.

– Интервал (два числа) – равновероятная возможность появления процесса в заданных диапазонах. Это допущение справедливо тогда, когда процесс проявляется в определённом диапазоне значений, его поведение разнообразно, но статистики недостаточно для каких-либо доказательных обобщений (малоприспособно для оценки показателей надёжности для ТСОИ, но потенциально применим [5]).

– Гистограмма (вектор) – эмпирическое распределение случайной величины, в котором каждое состояние системы или их группа имеют определённую частоту появления. Данная форма представления применима как при небольшом, так и при существенном объёме исходных статистических данных, не позволяющих перейти к аналитической форме по какой-либо причине. Для данных, имеющих эпистемическую неопределённость это вполне пригодный вид описания обобщённых статистических данных [2].

– Функция (закон) – аналитическая форма представления вероятности проявления случайного процесса (фактически, функция плотности распределения вероятностей значений потока отказов). При этом допускается, что найдена такая форма представления динамики потока отказов, которая отождествляется с её истинной формой, т.е. статистики очень много или имеется априори заданное распределение. Этот случай практически не применим для ТСОИ по причинам, указанным в пункте 1.1.3.

3 Какой тип арифметики будет применён для расчётов с данными, имеющими эпистемическую неопределённость: традиционная арифметика (используется по ГОСТам), интервальная арифметика, гистограммная арифметика, арифметика на нечётких множествах. Сразу отметим, что для ТСОИ не рационально применять интервальные вычисления и теорию нечётких (субъективных) множеств.

4 Какой метод расчётов даст наиболее правдоподобную картину распределения значений ВБР при наличии эпистемической неопределённости. Помимо традиционного подхода к оценке показателей надёжности, попросту

игнорирующему эпистемическую неопределённость, в разных исследованиях применяют [13, 15, 29]:

- Р-боксы (P-box) – это метод представления неопределённости, предполагающий, что существуют две монотонные функции на $[0,1]$, которые являются верхней и нижней границей (ящиком) для обратной неизвестной функции распределения;

- Облака (Neumaier's clouds) – это множество данных, обобщённое функцией принадлежности, по аналогии с идеей характеристических функций в методе нечёткой логики Л. Заде.

- Теория Демпстера-Шафера – это математическая теория очевидностей (свидетельств), основанная на функции доверия (belief functions) и функции правдоподобия (plausible reasoning), которые используются, чтобы скомбинировать отдельные части информации (свидетельства) для вычисления вероятности события.

- Ядерные оценки так же применяются при ограниченном объёме статистики, формируя на основе облака точек обобщённую оценку выборки.

- Интервальные гистограммы применяются в тех случаях, когда нет возможности получить точную функцию распределения случайной величины задают оценки плотности распределения сверху и снизу (гистограмма называется интервальной, если сами значения гистограммы принимают интервальные значения).

- Гистограммы первого и второго порядка, значения которых являются проявлением эпистемической неопределённости и обрабатываются с помощью методов численного вероятностного анализа (см. раздел 1.3).

5 Каково число операций обобщения, допустимое для оценки показателей надёжности ТСОН (очевидно, что чем их в конкретной методике меньше, тем результаты расчета значений оценок показателей надёжности будут достовернее).

К *операционным (вычислительным) источникам* снижения точности расчётов (повышения погрешностей) относятся:

- Выбор типов переменных в памяти ЭВМ, накладывающих ограничение на максимальную разрядность числовых значений вероятностей;
- Алгоритмы округления чисел, реализованных в конкретном программном обеспечении;
- Методы осуществления расчётных операций с числами (применение специальных алгоритмов оперирования с длинными числами, называемыми «длинной математикой», или использование традиционных).

Таким образом, становится очевидно, что методическое сопровождение процесса оценки показателей надёжности, имеющий научно обоснованный уровень точности, не может быть достигнут лишь учётом эпистемической природы значений $P(t)$ и $\lambda(t)$, а требует *системного решения*, затрагивая одновременно и методические, и вычислительные аспекты. В качестве базового подхода, который будет использоваться в данном научном исследовании, остановимся на использовании *численно-вероятностного анализа (ЧВА)*, оперирующего переменными–гистограммами.

1.3 Численный вероятностный анализ (ЧВА)

Численный вероятностный анализ (ЧВА) представляет собой раздел вычислительной математики, предметом которого является решение задач со стохастическими неопределенностями в данных в условиях элиторной и эпистемической неопределенности с использованием численных операций над плотностями вероятностей случайных величин и их функций. Необходимость разработки численных операций, определяющих предмет арифметики, определяется следующими основаниями. Одним из способов представления и описания стохастической неопределенности в данных является функция плотности вероятности. В рамках классической теории вероятностей приводятся аналитические формулы выполнения простейших арифметических

операций над случайными величинами. В реальности использование данных процедур или существенно затруднено, или практически невозможно, в следствии наличия малого объёма исходной статистики (эпистемической неопределённости). А поскольку при построении множества возможных решений требует осуществления набора операций над эмпирическими функциями плотности, то применение методов численного вероятностного анализа для данного класса задач, к которым относится и теория надёжности, является вполне оправданным решением.

Для разработки арифметики и построения законов распределения функций от случайных аргументов вводится последовательно понятие гистограммной переменной (гистограммного числа) и разрабатываются численные процедуры гистограммной арифметики. Идея гистограммного подхода заключается в следующем: наряду с общими представлениями случайных величин своими плотностями в виде непрерывных функций, можно рассматривать случайные величины, плотность распределения которых представляет гистограмму.

Гистограмма P – это кусочно-постоянная функция, определенная сеткой $\{z_i, i=0,1,\dots,n\}$, на отрезке $[z_{i-1}, z_i]$ гистограмма принимает постоянное значение p_i . *Гистограмма второго порядка* – это гистограмма, каждый столбец которой является гистограммой. Оба вида гистограмм могут быть представлены в памяти ЭВМ в виде *гистограммных переменных*, т.е. динамических массивов единичной и двойной размерности соответственно. Тогда в рамках численно-вероятностного анализа имеется возможность выполнения численных операций над плотностями случайных величин, отражающих закономерность потока отказов, и их функций, т.е. реализация *гистограммной арифметики*.

Базовыми операциями над гистограммами в гистограммной арифметике являются классические сложение, вычитание, умножение и деление [8, 15]. Суть реализации этих операций описывается следующей последовательностью действий:

1 вводится сетка пересечений гистограмм;

2 определяется носитель совместной вероятностей $p(x_1, x_2)$ – прямоугольная сетка размерностью n_2 , вероятность попадания в ячейки которой является постоянной величиной;

3 осуществляется обход каждой ячейки для вычисления значения её вклада в соответствующий отрезок итоговой гистограммы;

4 реализуется нормирование результатов.

Достоинством вычислений с помощью ЧВА будут:

- независимость от формы входных данных (вектор чисел, интервалы, функции приводятся к гистограммам);
- отсутствие ограничений на форму эмпирической функции плотности;
- достаточно высокая вычислительная эффективность;
- возможность визуализации промежуточных и итоговых результатов вычислений.

Таким образом появляется возможность оперировать функциями плотностями вероятностей, описывающих поток отказов, для вычислений показателей надёжности, опираясь на малый объём фактических данных.

1.4 Постановка исследовательской задачи

Аналитический обзор методов повышения достоверности расчётов показателей надёжности показал, что для СТО, относящихся к классу ТСОН, одной из ключевых проблем является отсутствие достаточного объёма фактической статистики для осуществления обоснованных расчётов, опираясь на вероятностные показатели. Оперирование показателями, имеющими значительный вклад эпистемической неопределённости, должно отличаться от традиционного, используя как специальные методы формализации, так и специальные методы расчёта. Исходя из этого, осуществим постановку исследовательской задачи в рамках данной магистерской диссертации.

Объект исследования: процесс расчёта показателей надёжности (вероятности безотказной работы) технических систем ответственного назначения по малой статистике отказов.

Предмет исследования: методическое обеспечение процесса расчёта показателей надёжности, имеющими значительный вклад эпистемической неопределённости, опираясь на численный вероятностный анализ.

Гипотеза исследования: применение элементов численного вероятностного анализа для расчёта значения показателей надёжности (на примере вероятности безотказной работы) при малой статистике о потоке отказов повысит их научное обоснование.

Таким образом, **цель научной работы** можно сформулировать следующим образом: разработать научно-обоснованную методику оценки значений показателей надёжности для технических систем ответственного назначения по малой статистике о потоке отказов.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1 Разработать методику сбора, обработки, вычислений и интерпретации показателей надёжности по малой статистике отказов, опирающуюся на численный вероятностный анализ, но не противоречащую действующим требованиям ГОСТ 27002-89;

2 Провести вычислительный эксперимент для подтверждения методики на данных о потоке отказов ТСОН, относящегося к изделиям ракетно-космической отрасли (на примере бортового оборудования космического аппарата);

3 Разработать рекомендации по применению методики оценки показателей надёжности по малой статистике отказов.

Методологической основой исследования будут выступать: теория надёжности, теория вероятностей и математическая статистика, численный вероятностный анализ, а так же ряд действующих нормативных документов, относящихся к методике сбора, обработки, вычислений и интерпретации показателей надёжности.

Допущения, принятые в работе: будем полагать, что исходная статистика об отказах существует и по ней можно построить гистограмму.

Ограничения исследования: будем опираться на действующую гостированную методику расчёта показателей надёжности [12], не смотря на то, что она уже частично моральное устарела.

1.5 Выводы по главе

Показатель надёжности, являясь одной из ключевых характеристик технических систем ответственного назначения, должен рассчитываться, опираясь на научно-обоснованные методы. Аналитический обзор предметной области позволяет сделать следующие выводы:

– Показано, что точность и достоверность расчёта показателей надёжности на прямую зависит от объёма исходной статистики о потоке отказов. При этом сам поток отказов задаётся функцией плотности вероятностей своих значений. Отмечено, что технические системы ответственного назначения, с одной стороны, имеют повышенные требования к надёжности оценки значения ВБР, а с другой – практически никогда не имеют достаточного объёма статистики отказов для расчета их вероятностных оценок.

– Выявлено, что учёт неопределённости в исходных данных, порождённый наличием малого объёма статистики о потоке отказов (эпистемическая неопределённость), требует выбора специальных методов формализации и организации расчётов. Среди существующих методов наиболее перспективным для данного класса задач является численный вероятностный анализ.

– Показано, что вычисления в численном вероятностном анализа осуществляются над гистограммами (в нашем случае – эмпирическими функциями плотности вероятностей отказов элементов ТСОИ) и они могут быть потенциально применены для оценки показателей надёжности.

– Определены предмет и объект диссертационного исследования, выдвинута гипотеза исследования, сформулированы цели и задачи исследования, отмечены ограничения и допущения.

Достижение цели исследования в первую очередь предполагает проработку его методической составляющей, чему и будет посвящена вторая глава работы.

2 Методика повышения точности оценки показателей надёжности с применением ЧВА

2.1 Требования к методике оценки показателей надёжности по малой статистике отказов

Теоретическое обоснование новой методики, позволяющей повысить точность оценок показателей надёжности по малой статистике отказов, предполагает наличие системы требований, которым она должна соответствовать. Опираясь на результат анализа из главы 1, осуществим выделение требований, которые должны лечь в основу методики:

- Научной обоснованности осуществления расчётов при малом объёме данных о потоке отказов;
- Независимости от формы входных данных (вектор чисел, интервалы, функции должны быть принудительно приведены к гистограммам);
- Отсутствия ограничений на форму эмпирической функции плотности потока отказов;
- Независимости от специфики ССН (последовательность вычислений остаётся той же, что и при оценивании без применения ЧВА);
- Соответствия основным положениям ГОСТ 27002-89 (обязательное условие, позволяющее в дальнейшем применять методику для этапов проектного обоснования и приёмки ТСОИ);
- Вычислительной эффективности, связанной с реализацией возможности реализации автоматизированной формы расчётов;
- Визуального представления как итоговых, так и промежуточных результатов вычислений.

На основании приведённой системы требований, опишем основные этапы методики, отдельное внимание уделив предобработке данных о потоке отказов.

2.2 Представление статистики потока отказов в виде гистограммы

Наличие потока отказов не позволяет сразу приступить к осуществлению расчётов. Для этого требуется проверить ряд условий.

Во-первых, требуется проанализировать данные из потока отказов и исключить те замеры (факты отказов), которые не могут достоверно свидетельствовать о факте выхода из строя соответствующего элемента технической системы. Для этого можно опираться на технологию цензурирования [11], особенно если после поломки объекта оценки нет возможности его непосредственного обследования.

Во-вторых, требуется оценить объём потока отказов. С одной стороны, он должен быть мал, т.е. иметь объём, не позволяющий сделать даже достоверное усреднение. В качестве ориентиров можно взять число замеров в интервале от 20 до 50, с которого начинают считать вероятности. Очевидно что для рассматриваемых ТСОН такой объём зачастую не имеется в наличии. Поэтому ограничением сверху будут значения в 20-15 отказов. Что касается ограничения снизу, что это значения в 8-10 значений, т.к. в противном случае нет возможности построить гистограмму, имеющую внятную форму. Для более малых выборок требуется восстанавливать распределение, используя специальные методы.

Во-третьих, требуется подобрать такой шаг деления измерительной шкалы, для которого можно построить гистограмму. С одной стороны, он должен быть не слишком широк, т.к. это будет снижать эффективность применения ЧВА для расчетов значений ВБР. С другой стороны – слишком малый шаг не позволит построить гистограмму. Поэтому такой шаг выбирается эмпирическим путём.

В-четвёртых, осуществляется построение гистограммы, опираясь на данные о частотах отказов в соответствующих интервалах измерительной шкалы. Для унификации расчётов их значения нормируются к единице, путём деления значений частот в каждом интервале на общее число измерений.

В-пятых, согласно ГОСТ 27002-89, для оценки ВБР потребуется опираться на экспоненциальный закон распределения. Это значит, что для каждого столбца гистограммы потребуется посчитать собственное значение λ или принять гипотезу о том, что λ является константой (средним или минимальным значением по гистограмме).

Результирующую переменную-гистограмму можно представить в как в виде вектора значений, так и в виде визуального образа. Теперь перейдём от обсуждения отдельных переменных-гистограмм к их множеству, на котором требуется осуществить расчёт значений ВБР.

2.3 Методика уточнения расчёта показателей надёжности по малой статистике отказов

Опишем получившуюся в результате исследования методику оценки ВБР опираясь на то, что исходные данные о потоках отказов были получены в результате испытаний/наблюдения за ТСОН. Выделим шесть основных этапов, рассмотрев суть каждого из них [28].

Первый этап «Предварительная обработка результатов». Предварительная обработка результатов измерений и выбор методов представления необходимы для того, чтобы в дальнейшем поднять уровень достоверности полученных оценок показателей надёжности и корректно применять методы ЧВА для построения законов распределения и функций плотности вероятности для исследуемых показателей [14, 15]. Его сущность заключается в последовательном выполнении таких действий, как регистрация данных о потоке отказов, их фиксация и кодирование, а так же «отбраковывание» отдельных значений при необходимости цензурирования [11]. Так же этот этап включает в себя составление ССН: показатели надёжности каждого i -го элемента ТСОН, топологию связей и специфику подключения резервных комплектов.

Второй этап «Первичное обобщение исходных данных». Он заключается в построении функций распределения вероятности потока отказов и его представлении в виде гистограммы для каждого элемента оцениваемой системы (возможен как с применением сглаживающих эмпирических функций распределения, так и без них), опираясь на материал п. 2.2.

Третий этап «Гистограммные расчёты надёжности отдельных узлов и блоков технической системы». Он предполагает расчёт ВБР для отдельных элементов (узлов) системы по гистограммным оценкам из второго этапа. Здесь и деле предполагается, что динамика изменения значений показателей надёжности подчиняется экспоненциальному закону распределения [21, 22].

Четвёртый этап «Оценка ВБР всей технической системы» (комплексная оценка). Его сущность заключается в осуществлении расчёта значения ВБР для целой системы, опираясь на специфику ССН (типы соединений и объёмы резервных комплектов подсистем) и ГОСТ 27002-89, но оперируя при вычислениях гистограммами.

Пятый этап «Анализ результатов расчёта ВБР». Он заключается в обобщении полученных на четвёртом этапе результатов и может быть представлен в виде следующих подэтапов:

- Сглаживание результирующей гистограммы значений ВБР (например, с помощью Эрмита сплайна);
- Формирование точечной оценки значения ВБР, опираясь на выбранную методику усреднения (например, используя расчёт значения математического ожидания ВБР).

Шестой этап «Визуально-интерактивное моделирование» (не обязателен). Он предполагает формирование дополнительных данных о результатах применения численного вероятностного анализа при оценке ВБР, выполняя *визуализирующую* и *информационную* функции, которые позволяют системному аналитику/специалисту по надёжности получить расширенную информацию как о методике расчёта показателя безотказной работы, так и о её

параметрах (математическое ожидание, дисперсия, квантили различных порядков и уровней).

На основании описанной методики составим обобщающую схему применения элементов численного вероятностного анализа к оценке ВБР ТСОИ, которая показана на рисунке 2.1.

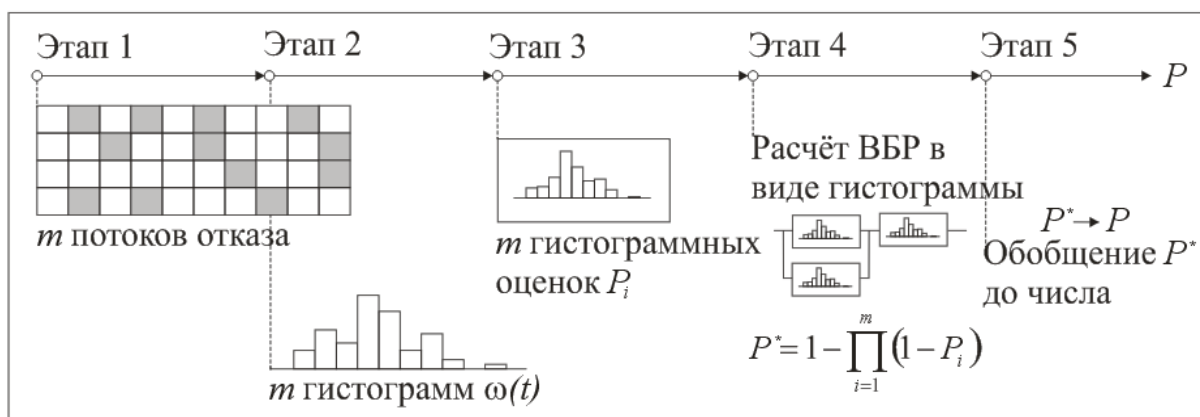


Рисунок 2.1 – Схема вычисления ВБР технической системы с использованием элементов численного вероятностного анализа

Следует отметить, что для отдельных видов систем, не имеющих достаточной статистики для обоснованного формирования функций плотности, на втором этапе методики может потребоваться осуществить процедуру восстановления распределения. Это отдельная задача, требующая отдельного научного исследования.

2.4 Выводы по главе

Методическая проработка вопроса оценки показателей надёжности по малому объёму статистики о потоке отказов позволила получить следующие результаты:

– Сформулирован ряд требований к содержанию методики, конкретизирующих тот положительный эффект, который должен быть достигнут в результате её разработки.

– Рассмотрена специфика обработки данных о статистике отказов для случая, когда её объём мал и необходимо оперировать гистограммными переменными.

– Разработана методика оценки показателей надёжности на базе гистограммных вычислений, включающая в себя пять базовых этапов и один дополнительный.

С целью подтверждения требований по точности оценок показателей надёжности проведём вычислительный эксперимент, привлекая реальную статистику об отказах ТСОИ.

3 Апробация методики при оценке показателей надёжности бортового оборудования спутника навигации

(текст главы изъят из всеобщего доступа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационное исследование было посвящено проблеме повышения достоверности и обоснованности значений показателей надёжности систем ответственного назначения (на примере компонентов космических навигационных аппаратов), имеющих малый объём статистической информации о потоке отказов. Цель диссертации была достигнута, а гипотеза исследования – подтверждена. Выполнены следующие задачи:

1 Сделан обзор предметной области и показано, что главной сложностью при вычислении значений показателей надёжности для систем, имеющих малый объём данных о потоке отказов, является невозможность получить достоверные значения его вероятностных характеристик;

2 Разработана методика сбора, обработки, вычислений и интерпретации показателей надёжности по малой статистике отказов, опирающуюся на численный вероятностный анализ, но не противоречащую действующим требованиям ГОСТ 27002-89;

3 Проведён вычислительный эксперимент по лётной статистике об отказах отдельных компонентов космического навигационного аппарата, который показал, что гистограммная оценка значения ВБР даёт достаточно предсказуемые результаты, сравнимые с оценками по гостированной методике;

4 Дан ряд рекомендации по применению методики оценки показателей надёжности по малой статистике отказов, опирающейся на гистограммные вычисления.

Научной новизной исследования является подтверждение принципиальной применимости численного вероятностного анализа для вычислений показателей надёжности при малом объёме статистических данных об отказах системы.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что предложена методика, позволяющая делать вычисления значения вероятности безотказной работы сложных технических объектов, не вступая в

противоречия с действующему ГОСТ 27002-89, но учитывающая эпистемическую неопределённость исходных данных о потоке отказов.

Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на:

- расширение области применения методики к различным ТСОИ;
- совершенствование принципов гистограммных вычислений;
- проектирование эффективного вычислительного программного модуля, позволяющего автоматизировать расчёт ВБР по разработанной методике, опираясь на произвольную структурную схему надёжности и различные (включая смешанные) формы представления исходных данных об отказах (точки, интервалы, гистограммы, гладкие функции).

По результатам диссертационного исследования опубликовано 6 научных статей [2, 20, 28-31].

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВБР – вероятность безотказной работы;

ГОСТ – государственный стандарт;

КА – космический аппарат;

СТО – сложный технический объект;

СТП – стандарт предприятия;

ССН – структурные схемы надежности;

ТСОН – техническая система ответственного назначения

ЧВА – численный вероятностный анализ;

ЭВМ – электронная вычислительная машина.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Dobronets, B.S. Numerical Probabilistic Analysis under Aleatory and Epistemic Uncertainty / B.S. Dobronets, O.A. Popova // *Reliable Computing*. 2014. Vol. 19. – pp. 274–289.
- 2 Uglev, V.A. The accuracy calculation control of reliability indices for equipment responsible appointment / V.A. Uglev, O.A. Popova, B.S. Dobronets // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. – Omsk: OmGTU, 2015. – pp. 5-8. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147248.
- 3 Абрамов, О.В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения / Абрамов О.В. // *Информатика и системы управления*. 2011. – № 2. – С. 4–15.
- 4 Алефельд, Г. Введение в интервальные вычисления. Пер. с англ. / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер. – М: Мир, 1987. – 360 с.
- 5 Антонов, А.В. Интервальная оценка характеристик надёжности уникального оборудования / А.В. Антонов, К.Н. Малковик, И.А. Чумаков // *Фундаментальные исследования*. — №12. 2011. – С. 71–76.
- 6 Векслер, А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин. – СПб.: АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2002. – 592 с.
- 7 Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. — 576 с.
- 8 Герасимов, В. А. Численные операции гистограммной арифметики и их применения / В. А. Герасимов, Б. С. Добронетц, М. Ю. Шустров // *Автоматика и телемеханика*. – 1991. - №2. – С. 83–88.
- 9 Горбоконеко, Е.Е. Основные проблемы качества бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов / Е.Е. Горбоконеко // *Материалы Международной научно-технической конференции*. – М.: МИРЭА, 2012. – С. 21-24.

- 10 ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995 (с изменениями на 16.01.2015). - 10 с.
- 11 ГОСТ 27.504-87. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по цензурированным выборкам – М.: Госстандарт СССР, 1987. – 20 с.
- 12 ГОСТ 27002-89 – М.: Госстандарт СССР, 1989. – 32 с.
- 13 Добронев, Б.С. Интервальная математика: учеб. пособ. / Б.С. Добронев. – Красноярск: КГУ, 2004. – 216 с.
- 14 Добронев, Б.С. Надежность информационных систем: учеб. пособ. / Б.С. Добронев. – Красноярск: СФУ, 2012. – 159 с.
- 15 Добронев, Б.С. Численный вероятностный анализ неопределенных данных: монография / Б.С. Добронев, О.А. Попова. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 167 с.
- 16 Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. Математика. Выпуск 3 / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 168 с.
- 17 Крянев, А. В. Математические методы обработки неопределенных данных / А. В. Крянев, Г. В. Лукин – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 216 с.
- 18 Ларичев, О.И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2000. – 296 с.
- 19 Международный электротехнический словарь. Надежность и качество услуг (IEC 60050-191): пер. с англ. – М.: МНТК «Надежность машин», 1990. – 152 с.
- 20 Морозова, А.И. Автоматизация принятия решений по применению методов оценки показателей надёжности и риска в системах ответственного назначения / А.И. Морозова, В.А. Углев, Б.С. Добронев // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - Красноярск: Монография, 2013. - С. 114-117.

21 Основы технической эксплуатации радиотехнических систем специального назначения: учебник / В.Н. Ратушняк [и др.]; под ред. К.А. Малыкова. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 334 с.

22 ОСТ РВ 0027-009-2008 Надежность военной техники. Методы оценки соответствия требованиям к надежности – М.: Росстандарт, 2009. – 35 с.

23 Патраев, В.Е. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах / В.Е. Патраев, В.В. Федосов // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. - №8. – С. 23-25.

24 Патраев, В.Е. Методы обеспечения и оценки надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования. / В.Е. Патраев. – Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2010. – 136 с.

25 Патраев, В.Е. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования / В.Е. Патраев, Ю.В. Максимов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – №4. – С. 5-12.

26 Система менеджмента качества. Этапность наземной экспериментальной отработки изделий предприятия. Виды отработочных и контрольных испытаний. Общие требования. – Железногорск: НПО ПМ, 2007. – 52 с.

27 Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 704 с.

28 Попова, О.А. Методология построения гарантированных оценок показателей надёжности для технических систем ответственного назначения / О.А. Попова, Б.С. Добронев, В.А. Углев // Безопасность и живучесть технических систем: Материалы V Всероссийской конференции. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – С. 154-158.

29 Углев, В.А. Выбор между методом Монте-Карло и гистограммной арифметикой при реализации моделей с элементами случайности / В.А. Углев

// Имитационное моделирование. Теория и практика: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. В 2 т. Том 1. - Казань: ФЭН, 2013. - С. 278-281.

30 Углев, В.А. Проблема возрастания вклада погрешностей в методах оценки надёжности сложных технических объектов / В.А. Углев // Интеллект и наука: Материалы XIII Международной научной конференции. – Железногорск: Филиал СФУ, 2013. – С. 128-129.

31 Углев, В.А. Разработка автоматизированной системы оценки показателей надёжности гистограммными методами / В.А. Углев // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – С. 311-312.

32 Ужга-Ребров О.И. Управление неопределенностями. Часть 1. / О.И. Ужга-Ребров // Современные концепции и приложения теории вероятностей. – Рēzekne: RA Izdevniecība, 2004. – 292 pp.

33 Чеботарёв, В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учебное пособие / В.Е. Чеботарёв, В.Е. Косенко. – Красноярск: СибГАУ, 2011. – 488 с.