

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт кибернетики  
Направление подготовки – Управление в технических системах (27.04.04)  
Кафедра автоматизации и компьютерных систем

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Получение нечётких показателей эксплуатационной надёжности на примере оборудования нефтегазового промысла</b>

УДК 519.873

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ41	Кармачев Денис Павлович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. АИКС	Лунева Е.Е.	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Конотопский В.Ю.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	К.Т.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АИКС	Фадеев А.А.	К.Т.Н.		

## Планируемые результаты обучения

	Результаты
P1	Применять глубокие естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами.
P2	Уметь обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с разработкой технических систем управления с использованием аналитических методов и сложных моделей.
P4	Выполнять инновационные инженерные проекты по разработке программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения с использованием современных методов проектирования, систем автоматизированного проектирования, передового опыта разработки конкурентно способных изделий.
P5	Планировать и проводить теоретические и экспериментальные исследования в области проектирования аппаратных и программных средств автоматизированных систем с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта. Критически оценивать полученные данные и делать выводы.
P6	Осуществлять авторское сопровождение процессов проектирования, внедрения и эксплуатации программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения.
P7	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий партнеров
P8	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, активно владеть иностранным языком, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке.
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена и руководителя группы, в том числе междисциплинарной и международной, при решении инновационных инженерных задач.
P10	Демонстрировать личную ответственность и ответственность за работу возглавляемого коллектива, приверженность и готовность следовать профессиональной этике и нормам ведения инновационной инженерной деятельности. Демонстрировать глубокие знания правовых, социальных, экологических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности.
P11	Демонстрировать способность к самостоятельному обучению, непрерывному самосовершенствованию в инженерной деятельности, способность к педагогической деятельности.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики  
 Направление подготовки стандартизация и метрология  
 Кафедра компьютерных измерительных систем и метрологии

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
--

Студенту:

Группа	ФИО
8AM41	Кармачеву Денису Павловичу

Тема работы:

Получение нечётких показателей эксплуатационной надёжности на примере оборудования нефтегазового промысла	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 2816/с от 13.04.2016 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Литература по теории надежности, нечетким множествам, математической статистики Данные об отказах аналогичных участков трубопроводов, электрических приводов, задвижек и блоков управления Стандарт компании ОАО «НК «Роснефть»
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Обзор вероятностных распределений, подходящих для анализа данных об отказах Анализ различных подходов к получению показателей надежности, принимающих нечеткие значения Исследование применимости аппарата нечетких множеств в получении показателей надежности электроприводов, запорной арматуры и трубопроводов. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Социальная ответственность Выводы по результатам работы.
<b>Перечень графического материала</b>	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>

Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	В. Ю. Конотопский
Социальная ответственность	Ю. В. Анищенко
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Описание объектов исследований. Сбор данных об отказах	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	25.09.2015
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АИКС ИК	Лунова Е.Е,	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ41	Кармачев Денис Павлович		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики

Направление подготовки стандартизация и метрология

Уровень образования магистратура

Кафедра компьютерных измерительных систем и метрологии

Период выполнения осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
30.05.16	Основная часть	60
12.05.16	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
19.05.16	Социальная ответственность	10
25.05.16	Обязательное приложение на иностранном языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АИКС	Лунова Е.Е.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АИКС	Фадеев А.С.	к.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8AM41	Кармачев Денис Павлович

Институт	Магистр	Кафедра	
Уровень образования		Направление/специальность	27.04.04 Управление в технических системах

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	
2. Разработка устава научно-технического проекта	
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
8. Потенциальные риски

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. Менеджмента	Конотопский В.Ю.	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Кармачев Денис Павлович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 8АМ41	ФИО Кармачеву Денису Павловичу
-----------------	-----------------------------------

Институт Уровень образования	магистратура	Кафедра Направление/специальность	27.04.04 «Теория систем управления»
---------------------------------	--------------	--------------------------------------	-------------------------------------

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.	<p><i>Характеристика объекта исследования:</i> способы получения нечетких показателей надежности для оборудования нефтегазового промысла.</p> <p><i>Области применения:</i> Объекты нефтегазового промысла, занимающиеся добычей, транспортировкой, подготовкой и переработкой нефти и газа.</p>
---	--

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.</p> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ требований и рекомендаций к уровню электромагнитных и электростатических полей, шума, отклонений показателей микроклимата, освещения рабочей зоны и вредных психофизиологических факторов.</li> <li>– Анализ опасных производственных факторов.</li> <li>– Описание действия факторов на организм человека, приведение допустимых норм с необходимой размерностью.</li> </ul>
<p><b>2. Экологическая безопасность</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы), гидросферу (сбросы), литосферу (отходы).</li> </ul>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– Разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Правовые нормы трудового законодательства, организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭИБЖ	Анищенко Ю.В.	к.т.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ41	Кармачев Денис Павлович		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалифицированная работа содержит 125 страниц текста, 48 рисунков, 8 таблиц, 5 приложений, 42 литературных источника

Ключевые слова: модели надёжности, показатели надежности, нечеткие величины, анализ надежности, электрический привод, задвижка, блок управления, трубопровод.

Цель работы: провести расчет эксплуатационных показателей надежности, принимающих нечеткие значения, для задвижки с электрическим приводом и блоком управления, а также для участков трубопроводов.

В процессе выполнения работы для анализа моделей надёжности, для оценки адекватности их адекватности и при получении показателей надежности, принимающих нечеткие значения, использовался математический пакет прикладных программ Mathcad 15, разработанный компанией РТС, персональный компьютер с ОС Windows 7.

В первой главе выполнен обзор основных теоретических сведений из области теории надёжности, математической статистики и математического аппарата нечетких множеств.

Во второй главе представлены основные этапы получения показателей надежности, принимающих нечеткие значения, в общем виде – расчет классических показателей надежности, адекватность моделей надежности для оценки данных об отказах, получение нечетких функций вероятности безотказной работы и интенсивности отказов.

В третьей главе представлены результаты моделирования эксплуатационных показателей надежности, принимающих нечеткие значения, для задвижки с электрическим приводом и блоком управления, а также для участков трубопроводов. приведены результаты моделирования надежности для тестового набора данных.

В четвёртой главе выполнено задание по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение». Были



использованы базовые и профессиональные знания в области проектного и финансового менеджмента, в том числе менеджмента рисков и изменений для управления комплексной инженерной деятельностью, соответствующей направлению подготовки.

В пятой главе выполнено задание по разделу «Социальная ответственность». Проанализированы проектируемая технология, рабочие места на предмет выявления основных техносферных опасностей и вредностей, оценена степень их воздействия на человека, окружающую среду, сформулированы методы защиты от них.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- ОАО – открытое акционерное общество;
- ДО – дочернее общество;
- НК – нефтяная компания;
- СС – сложная система;
- МН – модель надёжности;
- ВБР – вероятность безотказной работы;
- ИО – интенсивность отказов;
- ММП – метод максимального правдоподобия;
- ЗА – запорная арматура;
- ВНЭ – водонефтяная эмульсия;
- НР – научный руководитель;
- И – инженер;
- СанПин – санитарные правила и нормы;
- СНиП – строительные нормы и правила;
- $Q(t)$  – функция вероятности отказов (интегральный закон распределения случайной величины);
- $P(t)$  – функция вероятности безотказной работы;
- $\lambda(t)$  – функция интенсивности отказов;
- $\mu(t)$  – функция принадлежности;
- $f(t)$  – функция плотности вероятности отказов (дифференциальный закон распределения случайной величины).
- $\Lambda(X)$  – логарифмическая функция правдоподобия
- $\Theta$  – вектор параметров

## ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕФЕРАТ .....	8
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	10
ОГЛАВЛЕНИЕ .....	11
ВВЕДЕНИЕ .....	13
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	15
1.1 Основные сведения из теории надёжности .....	15
1.2 Модели надёжности .....	22
1.2.1 Классические модели надёжности .....	23
1.2.2 Сложные модели надёжности .....	26
1.3 Поиск коэффициентов моделей надёжности .....	29
1.4 Проверка адекватности МН для анализа данных об отказах .....	30
1.5 Понятие нечеткого множества.....	34
1.6 Оценка нечетких параметров моделей надёжности .....	36
2 НЕЧЕТКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ .....	39
2.1 Точечная оценка надёжности.....	39
2.2 Получение показателей надёжности, принимающих нечёткие значения	43
3 ПОЛУЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ, ПРИНИМАЮЩИХ НЕЧЕТКИЕ ЗНАЧЕНИЯ, ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА .....	48
3.1 Описание объектов исследования .....	48
3.2 Сбор информации об отказах.....	52
3.3 Расчет показателей надёжности для задвижки с электроприводом и блоком управления.....	55
3.4 Расчет показателей надёжности для трубопроводов.....	67
3.5 Дальнейшее применение результатов исследований .....	72
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	74
4.1 Планирование научно-исследовательских работ.....	74
4.2 Расчет сметы затрат на создание макета КУ .....	81

4.3	Оценка экономической эффективности проекта .....	86
5	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	90
5.1	Введение.....	90
5.2	Производственная безопасность .....	90
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	100
	СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА.....	102
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	103
	Приложение А .....	106
	Приложение Б.....	113
	Приложение В.....	114
	Приложение Г .....	115
	Приложение Д.....	1157

## ВВЕДЕНИЕ

В процессах добычи и первичной подготовки нефти и газа дочерние общества «НК «Роснефть» применяют оборудование и системы повышенной конструктивной сложности, которые способны выполнять ответственные и трудные задачи. При этом отказы таких систем характеризуются высокими экономическими потерями, негативным влиянием на экологическую обстановку, серьёзной угрозой здоровью и жизни рабочих. Нет смысла рассматривать какие-либо другие свойства машины или системы: качество, эффективность, безопасность, живучесть, управляемость, устойчивость. Так как каждое свойство из приведённых выше имеет смысл при наличии изначального свойства любой системы – надёжности [1]. По данным статистики 36% всех внештатных ситуаций случаются по вине отказов оборудования [2]. В связи с этим, повышение надёжности во всех отраслях нефтяного и газового промыслов является одной из основных задач «НК «Роснефть».

Для предотвращения аварий и катастроф необходимо уметь планировать профилактические ремонты систем, а значит, и прогнозировать их отказы. Оборудование нефтегазового промысла функционирует в изменяющихся условиях внешней среды и при различных режимах работы, в так называемых условиях неопределённости. Трубопроводный транспорт, подверженный коррозии, испытывает различные нагрузки в процессе эксплуатации, такие как – объём сырья, транспортируемый в единицу времени, а также давление, температура, состав сырья и т.д. В свою очередь запорная арматура функционирует в различных режимах на открытие и закрытие.

Для того чтобы учесть изменяющиеся условия эксплуатации и различные режимы работы оборудования, в расчетах надёжности, в рамках настоящего исследования, был применен аппарат нечетких множеств [3]. С целью повышения точности расчета эксплуатационной надёжности трубопроводной и запорной арматуры, работающих в условиях

неопределенности, была поставлена важнейшая задача – расчет нечетких показателей надежности.

Задача расчета показателей надежности системы сводится к анализу большого объема информации о системе в целом, к выбору адекватной модели надёжности, которая хорошо бы подходила для описания данных об отказах, а также к построению нечетких множеств, которые отражают степень влияния условий функционирования на безотказность конкретного объекта. В настоящее время на практике используются модели, которые несут в себе неполную информацию о системе, к тому же расчеты выполняются с упрощением, при котором за внешние факторы эксплуатации принимаются усредненные значения. Целью настоящего исследования является построение и расчет информативных, детальных показателей надёжности, которые бы давали достаточную информацию для анализа надежности и прогнозирования отказов систем.

Имея достаточную информацию о функционировании системы, результаты прогнозирования отказов можно предотвратить выход из строя систем, которые происходят по причинам технической неисправности. В связи с этим, можно избежать не только экономических потерь, но и человеческих жертв, а также снизить негативное воздействие на окружающую среду. К тому имея достаточно информативные показатели эксплуатационной надежности, можно выделить самое отказоустойчивое оборудования для его дальнейшего применения в рамках «НК «Роснефть».

# **1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

## **1.1 Основные сведения из теории надёжности**

В числе важнейших эксплуатационно-технических характеристик, определяющих эффективность объектов, особое место занимают показатели надёжности, безотказности и живучести.

Надёжность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонтов, хранения и транспортировки [1].

В определении можно выделить некоторые особенности. Прежде всего, это непрерывность, так как не говорят о надёжности объекта, во время проведения на нём ремонтов, замены оборудования, либо планово-предупредительных работ или других работ связанных с остановом объекта. Также включено понятие «установленные пределы», ведь системы, состоящие из большого количества элементов или подсистем, могут выполнять часть своих функций, т.е. сохраняют частичную работоспособность. Также целесообразно определять надёжность объекта в конкретный промежуток времени, например, во времени работы на заданном уровне мощности или за время до прекращения эксплуатации.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени [4].

Следует понимать, что при оценке безотказности объекта не учитываются перерывы в его работе (плановые и внеплановые). Безотказность характеризуется техническим состоянием объекта: исправностью, неисправностью, работоспособностью, неработоспособностью, дефектом, повреждением и отказом.

Исправное состояние объекта – это состояние, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации [5]. В противоположность этому, неисправное состояние объекта

– состояние, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и конструкторской документации. Когда объект находится в работоспособном состоянии, значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. Если значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность элемента выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям нормативно-технической документации, то такое состояние называют неработоспособным.

Отказ – событие, которое заключается в нарушении работоспособности объекта[6].

К основным признакам классификации отказов можно отнести:

1. Тип отказа:

- функциональный (неспособность объекта выполнять одну из основных функций);
- параметрический (выход параметров объекта за допустимые пределы);

2. Природа отказа:

- случайный, связанный с непредусмотренными перегрузками, браком, ошибками в управлении, неправильной эксплуатацией;
- систематический, обусловленный постоянными нагрузками, вызывающими постепенное накопление повреждений.

3. Характер возникновения:

- внезапный – отказ, характеризующийся быстрым изменением свойства или параметра объекта;
- постепенный – отказ, характеризующийся постепенным изменением свойства или параметра объекта.

4. Причина возникновения:

- конструкционный, связанный с неудачной конструкцией или ошибками проектирования;



- производственный – отказ, связанный с ошибками при производстве объекта или с несовершенной технологией;
- эксплуатационный – отказ, связанный с неправильной эксплуатацией или с её ошибками [6].

Надёжность составляют количественные характеристики одного или нескольких свойств объекта, которые называются показателями надёжности. К основным показателям надёжности можно отнести:

*Вероятность безотказной работы (ВБР)* – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. ВБР является одной из основных количественных характеристик безотказности объекта на заданном временном интервале. Обозначим через  $T$  время непрерывной исправной работы объекта от начала работы до первого отказа, а через  $t$  – время, за которое необходимо определить ВБР, то ВБР записывается в виде [1]

$$P(t) = P\{T \geq t\}, \quad t \geq 0.$$

Случайная величина  $T$  является неотрицательной и имеет непрерывное распределение. Функция ВБР наиболее полно определяет надёжность объекта. Она обладает следующими очевидными свойствами, вытекающими из определения вероятности:

$$1) 1 \geq P(t) \geq 0; \quad 2) P(0) = 1, \quad P(\infty) = 0$$

Статистически ВБР равна [1]

$$\hat{P}(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{N_0 - \sum_{i=1}^{1/\Delta t} n_i}{N_0} \approx \frac{N(t)}{N_0} \quad (1.1)$$

где  $N_0$  – число объектов в начале испытаний;  $n_i$  – число отказавших объектов в интервале времени  $\Delta t_i$ ;  $t$  – время, для которого определяется ВБР;  $N(t)$  – число объектов, исправно работающих на интервале  $[0, t]$ .

Характерный график функции  $P(t)$  изображен на рисунке 1.1.

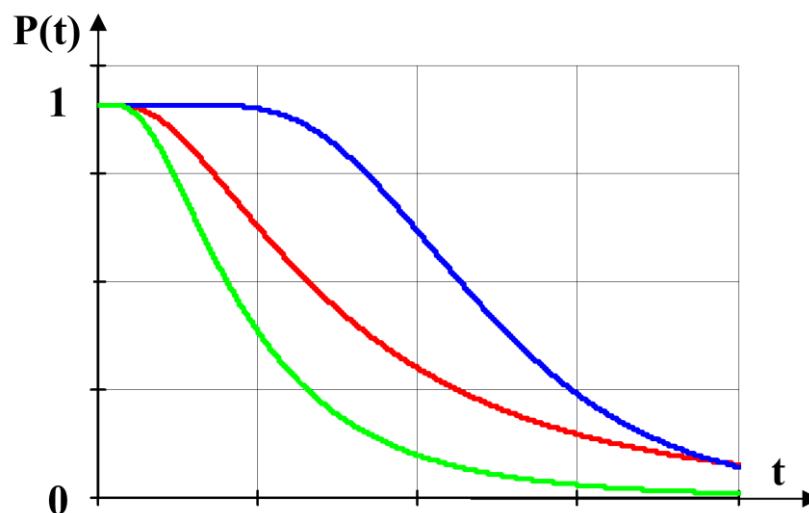


Рисунок 1.1 – Примеры графиков функций ВБР

Вероятность того, что отказ объекта произойдет за время, не превышающее заданной величины  $t$ , т.е. что  $T < t$ , как вероятность события, противоположному тому, при котором  $t \leq T$ , равна [4]

$$Q(t) = P\{T < t\} = 1 - P(t), \quad 0 \leq t.$$

Функция  $Q(t)$  представляет собой интегральную функцию распределения случайной величины, т.е.  $Q(t) = F(t)$ . Если функция  $Q(t)$  дифференцируема, то производная от интегральной функции распределения есть дифференциальный закон (плотность) распределения случайной величины  $T$  – времени исправной работы [1]:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.2)$$

Таким образом, безотказность объекта так можно характеризовать плотностью вероятностей момента первого отказа.

Статически вероятность отказа равна [1]

$$\hat{Q}(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{\sum_{i=1}^{1/\Delta t} n_i}{N_0}$$

где  $N_0$  – число объектов в начале испытаний;  $n_i$  – число отказавших объектов в интервале времени  $\Delta t_i$ ;  $t$  – время, для которого определяется ВБР.

Характерный график функции  $Q(t)$  приведен на рисунке 1.2.

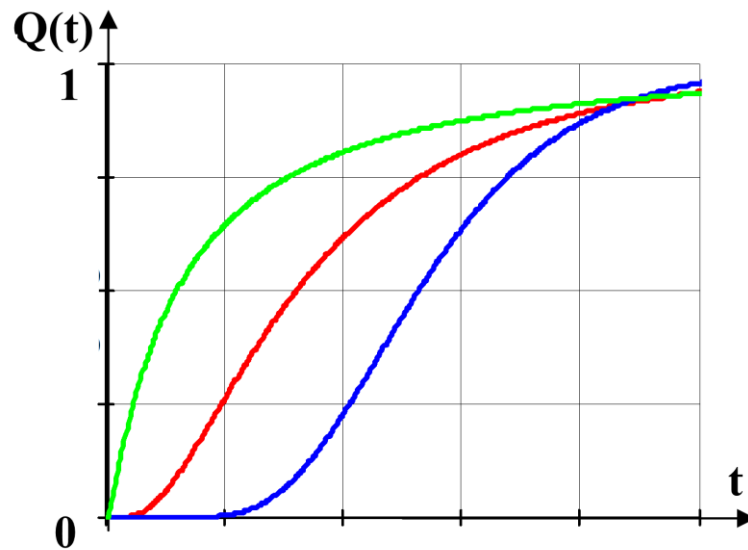


Рисунок 1.2 – Примеры графиков интегральной функции распределения случайной величины

Плотность вероятности  $f(t)$  статически определяется по формуле [2]

$$\hat{f}(\Delta t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N_0 \Delta t},$$

где  $\Delta n(\Delta t)$  – число отказов за интервал времени  $\Delta t$ .

Очевидно, что функцию распределение случайной величины можно представить как: [6]

$$Q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau$$

Тогда ВБР выражается следующим образом: [3]

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau.$$

*Средняя наработка до отказа.* Функции распределения (интегральная функция и плотность) полностью характеризуют случайную величину. Однако для решения некоторых задач достаточно знать только несколько моментов случайно величины. Напомним, что моментом  $k$ -го порядка называют интеграл

$$m_k = \int_0^{\infty} t^k f(t) dt,$$

если величина этого интеграла конечна. В теории надёжности чаще всего используют моменты первых двух порядков. Момент первого порядка (математическое ожидание) наработки до первого отказа  $m_1\{T\}$  обозначают  $T_{cp}$  и называют средней наработкой до отказа (или средним временем безотказной работы) [5]

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt.$$

Статическая оценка средней наработки до отказа однотипных объектов равна [7]

$$\hat{T}_{cp} \approx \frac{1}{N_0} \sum_{j=1}^{N_0} t_j,$$

где  $t_j$  – время исправной работы  $j$ -го объекта.

*Интенсивность отказов* - это отношение числа отказавших объектов в единицу времени к среднему числу объектов, продолжающих исправно работать в данных интервал времени.

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N(t)\Delta t},$$

где  $\Delta n(\Delta t)$  – число отказов объекта за промежуток времени от  $(t - \Delta t/2)$  до  $(t + \Delta t/2)$ .

$$N(t) = \frac{N_{i-1} + N_i}{2},$$

где  $N_{i-1}$  – число исправно работающих объектов в начале интервала времени  $\Delta t$ ;

$N_i$  – число исправно работающих объектов в конце интервала времени  $\Delta t$ .

Функция интенсивности отказов может быть найдена, как

$$\lambda(t) = \frac{Q'(t)}{1 - Q(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)} \quad (1.3)$$

Интенсивность отказов или  $\lambda$ -характеристика показывает, какая часть объектов выходит из строя в единицу времени по отношению к среднему числу

исправно работающих объектов. [1] Является основополагающим показателем надёжности, часто используется при прогнозе, анализе отказов и расчёте надёжности систем. Характерная кривая показана на рисунке 1.3.

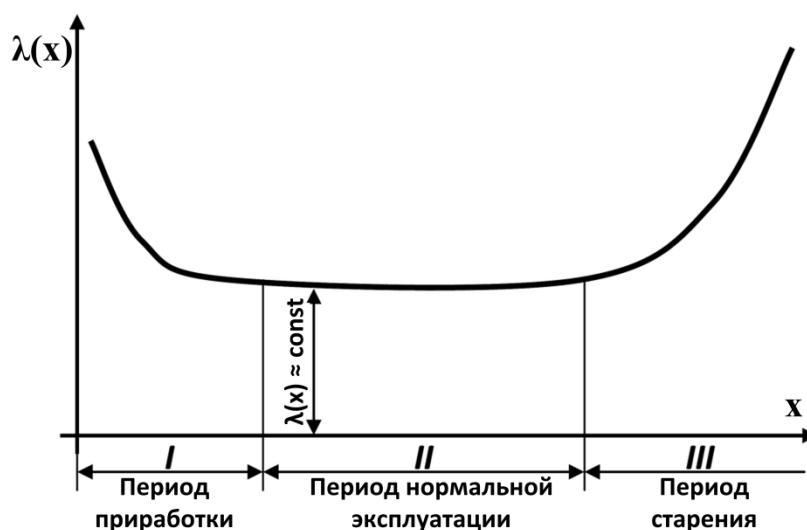


Рисунок 1.3 – Характерная кривая интенсивности отказов

Кривая изменения интенсивности отказов имеет три явно выраженных участка: период приработки, период нормальной эксплуатации и период старения. В периоде приработки выявляются отказы по вине проектировщиков, конструкторов и изготовителей. Здесь характерны внезапные отказы объекта, в данном периоде могут отказывать, к примеру, бракованные изделия. Период нормальной эксплуатации характерен наименьшим количеством отказов. Третий период включает в себя отказы, которые обусловлены износом и старением объекта.

## 1.2 Модели надёжности

В теории надёжности применяют два класса случайных величин – дискретные и непрерывные. Примерами дискретных случайных величин может служить число отказов или восстановлений объекта за определённый заданный временной интервал, а также число циклов на отказ. Примерами непрерывных случайных величин могут служить: наработка объекта до отказа, наработка объекта между двумя отказами, время восстановления, интенсивность отказов.

Отказ является центральным понятием в теории надёжности, «закрывающийся в нарушении работоспособного состояния объекта» [6]. Сам факт отказа является детерминированным явлением; при этом неполнота сведений об объекте и протекающих в нём и окружающей среде процессов приводят к вероятному характеру отказов. Другими словами отказ объекта может быть вызван разными причинами и иметь различный характер и природу. Время возникновения отказа является случайной величиной, в связи, с чем вероятность этого события может быть вычислена с применением разнообразных подходов. Наиболее обоснованным из них является применение в теории надёжности методов теории вероятностей, а именно применение распределений случайных величин, в качестве моделей надёжности.

Чаще всего модель надёжности (МН) задается через функцию вероятности безотказной работы.

В самом общем виде МН можно представить как:

$$P(t, \Theta),$$

где  $\Theta = \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix}$  – вектор параметров для определённой модели надёжности.

## 1.2.1 Классические модели надёжности

**1. Экспоненциальное распределение.** Является однопараметрическим распределением и широко используется при расчётах надёжности технических систем. [1]

ВБР для данного распределения может быть представлена как: [1]

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.4)$$

где  $\lambda > 0$  - параметр, для  $t$  от 0 до  $\infty$ .

Согласно формуле (1.2) плотность распределения случайной величины выражается следующим образом:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Интенсивность отказов для экспоненциального распределения представляется по формуле (1.3) как:

$$\lambda(t) = \lambda. \quad (1.5)$$

Таким образом, параметр  $\lambda$  представляет постоянную интенсивность отказов. Из формулы (1.5) видно, что график функции интенсивности отказов включает в себя лишь второй период (период нормальной эксплуатации), поэтому применение данного распределения для анализа и расчёта надёжности не всегда целесообразно.

**2. Распределение Релея.** Является однопараметрическим распределением.

Вероятность безотказной работы для распределения Релея выглядит следующим образом: [5]

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}},$$

где  $\sigma > 0$  – параметр для  $t$  от 0 до  $\infty$  [1].

Согласно формуле (1.2) плотность распределения случайной величины выражается следующим образом:

$$f(t) = \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}.$$

Интенсивность отказов для данного распределения находится по формуле (1.3) как:

$$\lambda(t) = \frac{t}{\sigma^2}. \quad (1.6)$$

Из выражения (2.2) видно, что график функции имеет линейный вид (рисунок 2.1)

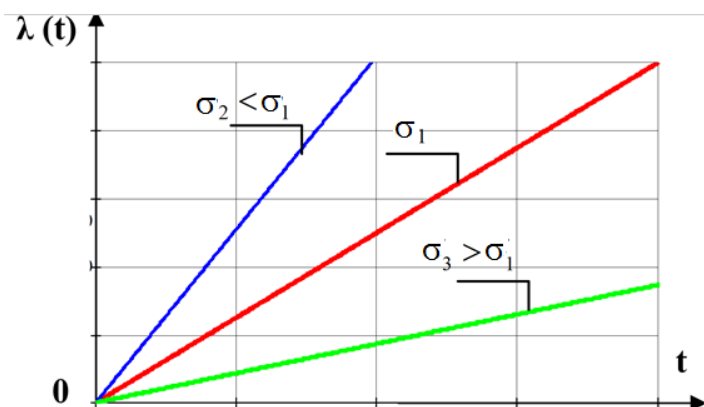


Рисунок 1.4 – График функции интенсивности отказов для МН Релея

С ростом параметра  $\sigma$  угол наклона прямой уменьшается. Данное распределение может быть использовано для описания периода старения, и периода нормальной эксплуатации при  $\sigma \rightarrow \infty$ .

**3. Распределение Вейбулла-Гнеденко.** Широко применяется в теории надёжности, в качестве МН, для описания времени безотказной работы объектов. В основе модели используется двухпараметрическое распределение, которое описывает предельное распределение максимума для  $t$  от 0 до  $\infty$ .

Вероятность безотказной работы выглядит следующим образом: [7]

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (1.7)$$

где  $\beta > 0$  - параметр масштаба,  $\eta > 0$  - параметр формы.

Согласно формуле (1.2) плотность распределения случайной величины можно представить, как :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}.$$



Интенсивность отказов для данного распределения определяется по формуле (1.3) как:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}. \quad (1.8)$$

При  $\beta=1$  распределение принимает вид экспоненциального распределения, при  $\beta=2$  вид распределения Релея.

Из выражения (2.3) следует, что график функции имеет нелинейный вид (рисунок 2.2).

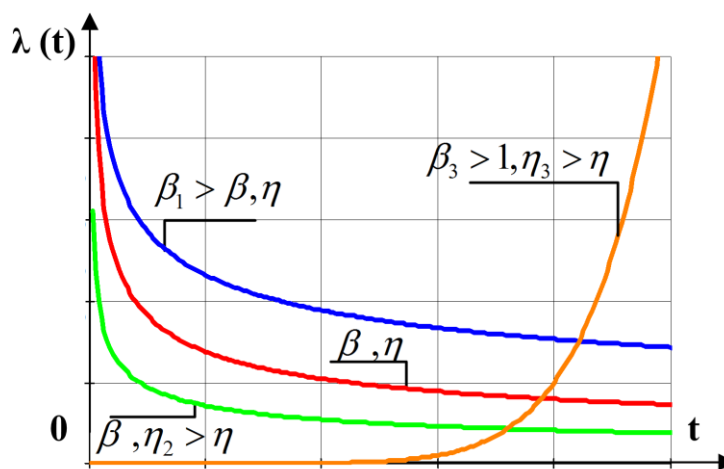


Рисунок 1.5 – График функции интенсивности отказов распределения Вейбулла-Гнеденко

Параметр  $\beta$  напрямую влияет на скорость убывания функции на первом участке и возрастания на третьем. Кроме того при  $\beta < 1$  график функции  $\lambda(t)$  принимает форму кривой, которая включает в себя первый и второй период, при  $\beta > 1$  график функции интенсивности отказов принимает форму кривой, включающую последние два периода. Параметр  $\eta$  влияет на положение точек перегиба кривой, т.е. перехода функции интенсивностей отказов с первого участка на второй и со второго на третий.

График функции  $\lambda(t)$  для данного распределения может принимать различный вид, включающий первый и второй участки, либо второй и третий. В связи с чем, на практике часто в качестве сложных моделей надёжности, с U-

образной формой кривой интенсивности отказов, принимают различные комбинации распределений Вейбулла.

### 1.2.2 Сложные модели надёжности

Графики кривых интенсивностей отказов большинства используемых на практике моделей надёжности (МН), основанных на простых законах распределения времени наработки (экспоненциальный и нормальный законы, распределение Вейбулла-Гнеденко, Релея и др.) позволяют учитывать лишь часть от характерной U-образной кривой. В связи с этим, использование таких моделей для анализа надёжности не всегда даёт корректные результаты, т.к. во внимание не берутся интервалы приработки либо износа.

В связи с этим, одна из задач современных исследователей в области надёжности – поиск законов распределений, для которых форма кривой функции интенсивности отказов, близка к виду, изображенному на рисунке 1.3.

Целью настоящего исследования является изучение влияния параметров моделей надёжности, введенных в работах [8,9], на форму кривой интенсивности отказов.

1. В случае **J-образного распределения**, рассмотренного как МН в работе [8], функция ВБР определяется выражением:

$$P(t) = \begin{cases} 1 - (t/b)^v (2 - t/b)^v, & 0 \leq t \leq b \leq \infty, \\ 1, & t < 0, \\ 0, & t > b, \end{cases} \quad (1.9)$$

где  $b$  и  $v$  - параметры модели.

Согласно формуле (1.2) плотность распределения случайной величины для данной модели определена как:

$$f(t) = \frac{2v}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{v-1} \left(1 - \frac{t}{b}\right) \left(2 - \frac{t}{b}\right)^{v-1}. \quad (1.10)$$

Тогда, интенсивность отказов в соответствии с формулой (1.3) примет вид:

$$\lambda(t) = \frac{2\nu}{b} \frac{(1-t/b)(1-(1-t/b)^2)^{\nu-1}}{1-(1-(1-t/b)^2)^\nu}. \quad (1.11)$$

В результате исследования выявлено, что функция интенсивности отказов для данной МН принимает вид, сходный с рис. 1 при  $0 < \nu < 1$ . Кроме того, значения функции  $\lambda(t) \rightarrow \infty$  при  $t \rightarrow 0$  и  $t \rightarrow b$  [8].

J-образное распределение является одним из немногих двухпараметрических распределений, которые имеют форму кривой интенсивности отказов схожую с характерной. Распределение является одним из самых оптимальных из исследованных, оно просто в настройке, однако, его недостаток заключается в ограниченной параметром  $b$  области определения функции интенсивности отказов.

Среднее время наработки на отказ для J-образного распределения определяется по формуле [8]:

$$T_{cp} = b - b4^\nu \frac{\Gamma(1 + \nu)}{\Gamma(2 + 2\nu)},$$

где  $\Gamma(x)$  – гамма функция.

2. В качестве МН в рамках настоящего исследования было использовано **Комплементарное Вейбулл-геометрическое распределение Кумарасвами** (Kumaraswamy complementary Weibull geometric distribution (Kw-CWG) [9].

Функция вероятности безотказной работы имеет вид:

$$P(t) = \left\{ 1 - \alpha^a \left( 1 - \exp \left[ -(\gamma t)^\beta \right] \right)^a \left( \alpha + (1 - \alpha) \exp \left[ -(\gamma t)^\beta \right] \right)^{-a} \right\}^b, \quad (1.12)$$

где  $\gamma > 0$  – параметр масштаба,  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ ,  $a > 0$ ,  $b > 0$  – параметры формы.

Распределение Kw-CWG. Данное распределение является достаточно гибким и универсальным, поскольку является общим случаем для набора других распределений. Кроме того, при  $\alpha = 1$ ,  $a = 1$ ,  $b = 1$  Kw-CWG принимает

вид распределения Вейбулла [9]. Также, если приравнять к 1 все параметры кроме  $\gamma$ , можно получить экспоненциальное распределение, а при  $\alpha = 1, \beta = 2, a = 1, b = 1$  – распределение Релея.

Функция  $\lambda(t)$  для Kw-CWG распределения принимает характерную форму кривой и имеет вид:

$$\begin{aligned} \lambda(t) = & \alpha^a \beta \gamma a b (\gamma t)^{\beta-1} \times \\ & \times \left( \alpha + (1 - \alpha) \exp \left[ -(\gamma t)^\beta \right] \right)^{-a-1} \exp \left[ -(\gamma t)^\beta \right] \times \\ & \times \left( 1 - \exp \left[ -(\gamma t)^\beta \right] \right)^{a-1} \times \\ & \times \left( 1 - \frac{\alpha^a \left( 1 - \exp \left[ -(\gamma t)^\beta \right] \right)^a}{\left( \alpha + (1 - \alpha) \exp \left[ -(\gamma t)^\beta \right] \right)^a} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

В результате исследования было установлено, что параметр  $\gamma$  влияет на масштаб функций вероятности безотказной работы и интенсивности отказов. Остальные параметры распределения оказывают влияние на формы кривых данных функций.

Kw-CWG распределение является громоздким и сложным в настройке, но за счет своей гибкости и универсальности позволяет максимально точно описать данные об отказах.

Среднее время наработки на отказ для данного распределения определяется по формуле:

$$T_{cp} = \gamma^{-1} \sum_{k,i=0}^{\infty} s_{k,i} (k+i+1)^{-1/\beta} \Gamma(1+1/\beta),$$

где

$$s_{k,i} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^{j+1} a \Gamma(b+1) \Gamma(aj+a) \Gamma(aj+a+k+1)}{j! k! i! \alpha (k+i+1) \Gamma(b-j) \Gamma(aj+a+1) \Gamma(ak+a-i)} \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right)^k,$$

$\gamma, \alpha, \beta, a, b$  – параметры распределения.

### 1.3 Поиск коэффициентов моделей надежности

В ходе настоящего исследования для анализа данных об отказах были построены кривые ВБР, исследуемых моделей надёжности. Для построения функций, а в частности для поиска неизвестных коэффициентов МН был применен метод максимального правдоподобия (ММП), разработанный Р.Фишером в 1912 г. [10].

Для оценивания параметров распределения случайной выборки по ММП необходимо знать тип распределения выборки с точностью до неизвестных параметров. В нашем случае это вектор параметров МН:

$$\Theta = \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix}.$$

Модель надежности изначально неизвестна, поэтому в процессе работы различные распределения тестируются на соответствие МН выборке времен отказов с целью определения наиболее адекватной модели.

ММП основан на использовании функции правдоподобия (ФП), которая строится по выборке следующим образом. Рассмотрим совокупность возможных значений СВ  $t_i, i = 1 \dots n$ . В случае непрерывного распределения, априорная плотность вероятности совокупности  $\{t_i\}$  определяется на основе произведения плотностей: [11]

$$f(t, \Theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \Theta). \quad (1.14)$$

В случае неизвестных параметров на основе выборки реализаций  $\{t_i\}$ , функция правдоподобия строится на основе зависимостей для плотности вероятности (1.14), в которые подставляются значения  $\{t_i\}$ .

$$L(\Theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \Theta). \quad (1.15)$$

Таким образом, при известном типе распределения (в рамках исследования – при заданной модели надежности) и полученной выборке ФП определяется по зависимости (1.15) и является функцией от возможных оценок неизвестных параметров распределения СВ (в рамках исследования – времен распределения отказов).

В соответствии с ММП в качестве точечных оценок параметров модели надежности принимаются значения, при которых ФП или ее логарифм достигают максимума:

$$L(\Theta) = \max \quad \text{или} \quad \ln L(\Theta) = \max. \quad (1.16)$$

Тогда оценки неизвестных параметров по ММП можно вычислить из необходимых условий экстремума на основе системы уравнений:

$$\frac{dL(\Theta)}{d\theta_j} = 0 \quad \text{или} \quad \ln \frac{dL(\Theta)}{d\theta_j} = 0, \quad j = 1, \dots, J. \quad (1.17)$$

В рамках данной работы метод максимального правдоподобия также был применен для нахождения параметров распределений для выборки отказов, цензурированной справа. Выборка называется цензурированной справа, если оценка параметров модели надежности проводится для объекта в пределах его наработки  $t$ , а остальные отказы, случившиеся позднее этого времени исключаются из анализа. [12]

В таком случае функция правдоподобия имеет вид: [13]

$$L(\Theta) = \prod_1^{N_1} f(t_j, \Theta) + \prod_{N_1+1}^n [1 - F(S, \Theta)], \quad (1.18)$$

где  $n$  – весь объем выборки отказов, а  $N_1$  – количество наблюдаемых отказов, для которой в ходе оценки выполняется поиск неизвестных параметров модели надежности;  $S$  – крайнее значение из выборки  $N_1$ , на котором закончились наблюдения за объектом.

#### 1.4 Проверка адекватности МН для анализа данных об отказах

В рамках данной работы был проведен анализ адекватности используемых моделей надежности для оценки данных об отказах объектов

исследований. В процессе анализа были рассмотрены следующие критерии согласия:

1. критерий «хи-квадрат» (Пирсона);
2. критерий Колмогорова;
3. критерий Крамера-Мизеса-Смирнова.

Критерий  $\chi^2$  Пирсона. Применение критериев типа  $\chi^2$  предусматривает разбиение области определения случайной величины на  $k$  интервалов с подсчетом числа наблюдений  $n_i$ , попавших в них, и вероятностей попадания в интервалы  $P_i(\hat{\Theta})$ , соответствующих теоретическому закону. Статистика критерия согласия  $\chi^2$  Пирсона имеет вид: [14]

$$X_n^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(n_i / n - P_i(\hat{\Theta}))^2}{P_i(\hat{\Theta})}, \quad (1.19)$$

где  $n$  – общее число наблюдений.

В случае проверки простой справедливой гипотезы в пределе эта статистика подчиняется  $\chi_{k-1}^2$ -распределению с  $k-1$  степенями свободы [14].

В случае цензурированной выборки, разбиение области определения случайной величины производят на  $k+1$  интервалов, причем в последнем интервале находятся все предполагаемые наблюдения, не вошедшие в цензурированную выборку. Последний интервал начинается в  $k$  и заканчивается в  $\infty$  [14].

Критерий согласия Колмогорова. В критериях типа Колмогорова измеряемое расстояние между эмпирическим  $F_n(t)$  и теоретическим  $F(t, \hat{\Theta})$  распределениями имеет вид:

$$D_n = \sup_{|x| < \infty} |F_n(t) - F(t, \hat{\Theta})|, \quad (1.20)$$

где  $n$  – объем выборки. В случае справедливости простой проверяемой гипотезы при  $n \rightarrow \infty$  статистика  $\sqrt{n}D_n$  подчиняется распределению Колмогорова  $K(s)$ [15].

Для цензурированной выборки вместо эмпирических функций распределения используется непараметрическая оценка Каплана – Мейера [16].

Обозначим через  $a_1 < a_2 < \dots < a_k = \tau$ ,  $k \leq n$ , значения полных наблюдений  $(Z_i, \delta_i = 1)$  в выборке остатков  $(Z_1, \delta_1), (Z_2, \delta_2), \dots, (Z_n, \delta_n)$ . Тогда оценку Каплана – Мейера можно вычислить по формуле

$$\hat{F}_n(t) = 1 - \prod_{t_i \leq t} (1 - d_i / c_i),$$

где  $d_i = \sum_{Z_j = a_i} \delta_j$ ;  $c_i$  – количество наблюдений, для которых  $Z_j \geq t_i, j = 1, \dots, n$ .

Тогда измеряемое расстояние по критерию Колмогорова принимает вид [17]

$$D_n^C = \sup_{0 \leq t \leq \tau} \left| \hat{F}_n(t) - F_0(t, \Theta) \right|, \quad (1.21)$$

Где  $\hat{F}_n(t)$  - оценка Каплана – Мейера функции распределения,  $F_0(t, \Theta)$  - теоретическая функция распределения, соответствующая проверяемой гипотезе.

Наиболее часто в критерии Колмогорова используют статистику вида [16] с поправкой, предложенной Большевым [18]:

$$S_k = \frac{6nD_n + 1}{6\sqrt{n}}, \quad (1.22)$$

где

$$D_n = \max(D_n^+, D_n^-),$$

$$D_n^+ = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{i}{n} - F(t_i, \Theta) \right\}, \quad D_n^- = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ F(t_i, \Theta) - \frac{i-1}{n} \right\},$$

$n$  – объем выборки,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  - упорядоченные по возрастанию выборочные значения. В случае справедливости простой проверяемой гипотезы статистика  $S_k$  в пределе подчиняется закону распределения Колмогорова  $K(S)$  [16].

Критерий Крамера-Мизеса-Смирнова. Статистика рассматриваемого критерия  $\omega^2$  имеет вид: [16]



$$S_{\omega} = n\omega_n^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left\{ F(t_i, \hat{\Theta}) - \frac{2i-1}{2n} \right\}^2. \quad (1.23)$$

При справедливости простой гипотезы статистика в пределе подчиняется закону с функцией распределения  $a_1(s)$  [16].

В случае цензурированной выборки, статистика данного критерия с оценкой Каплана – Мейера имеет вид [17]

$$S_{\omega}^C = \frac{n}{3} F_0(a_i; \hat{\Theta}) + n \sum_{j=1}^{k-1} \left[ \hat{F}_n^2(a_j)(F_0(a_{j+1}; \hat{\Theta}) - (F_0(a_j; \hat{\Theta}))) - \right. \\ \left. - \hat{F}_n(a_j)(F_0^2(a_{j+1}; \hat{\Theta}) - (F_0^2(a_j; \hat{\Theta}))) + \right. \\ \left. + \frac{1}{3}(F_0^2(a_{j+1}; \hat{\Theta}) - (F_0^2(a_j; \hat{\Theta}))) \right]. \quad (1.24)$$

В данной работе, значения статистики для всех критериев согласия сравнивались с табличными значениями для различных  $\alpha$ -уровней значимости [18]. Под уровнем значимости понимают вероятность отклонить гипотезу, если она на самом деле верна.

Для сравнения моделей были использованы информационные критерии, как меры качества применяемых моделей. Информационные критерии позволяют сравнить качество моделей и выбрать среди них наилучшую, считая, что качество зависит не только от правдоподобия, но и от простоты модели [19]. Иными словами, среди моделей следует выбрать ту, которая адекватно описывает реальные данные и при этом является более простой. Расчет значений критериев предполагает «штраф» за количество параметров модели, следовательно, среди моделей следует выбрать ту, значение критериев которой меньше.

В рамках настоящего исследования были использованы следующие информационные критерии: [20]

1. Информационный критерий Акаике (AIC):

$$AIC = -2L(\hat{\Theta}) + 2p, \quad (1.25)$$

где  $p$  – количество параметров модели надежности./

2. Состоятельный информационный критерий Акаике (CAIC):

$$CAIC = -2L(\hat{\Theta}) + \frac{2pN}{N - p - 1}. \quad (1.26)$$

3. Байесовский информационный критерий (BIC):

$$BIC = -2L(\hat{\Theta}) + p \ln(N). \quad (1.27)$$

4. Информационный критерий Ханнана-Куина (HQIC):

$$HQIC = -2L(\hat{\Theta}) + 2p \ln(\ln(N)). \quad (1.28)$$

### 1.5 Понятие нечеткого множества

Для получения показателей надежности, принимающих нечеткие значения, параметры моделей надежности  $\Theta$  (формула 1.4) могут быть заданы в виде нечетких чисел.

Следуя Заде [3], введем понятие нечеткого множества следующим образом.

Пусть  $U$  – некоторое множество элементов  $u$  и  $\mu_A : U \rightarrow [0,1]$ . Нечетким подмножеством  $A$  в  $U$  называется множество вида  $\{(u, \mu_A(u)) : u \in U\}$ ; при этом значение  $\mu_A(u)$  называется степенью принадлежности  $u$  к  $A$ .

Таким образом, задание нечеткого подмножества  $A$  в  $U$  эквивалентно заданию его функции принадлежности  $\mu_A(u)$ . В рамках настоящего исследования употребляется термин «нечеткое множества» вместо более корректно термина «нечеткое подмножество».

Нечетким числом называют нечеткое подмножество универсального множества действительных чисел, имеющее нормальную и выпуклую функцию принадлежности, при которой существует такое значение носителя, в котором функция принадлежности равна единице, и при отступлении от своего максимума влево или вправо функция принадлежности убывает [3].

Приведенное определение нечеткого множества является общим. При построении и анализе показателей надежности, принимающих нечеткие значения, используются различные его частные случаи.

Ниже приведены два примера нечетких множеств, точнее, функций принадлежности, соответствующих им. Ими являются так называемые s- и  $\pi$ -функции, задаваемые как:

$$S(u; \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0 & \text{для } u \leq \alpha, \\ 2 \left( \frac{u - \alpha}{\gamma - \alpha} \right)^2 & \text{для } \alpha \leq u \leq \beta, \\ 1 - 2 \left( \frac{u - \gamma}{\gamma - \alpha} \right)^2 & \text{для } \beta \leq u \leq \gamma, \\ 1 & \text{для } u \geq \gamma. \end{cases}$$

$$\pi(u; \beta, \gamma) = \begin{cases} S(u; \gamma - \beta, \gamma - \frac{\beta}{2}, \gamma) & \text{для } u \leq \gamma, \\ S(u; \gamma, \gamma + \frac{\beta}{2}, \gamma + \beta) & \text{для } u \geq \gamma. \end{cases}$$

Их графики имеют вид, как указано на рисунках 1.6 и 1.7.

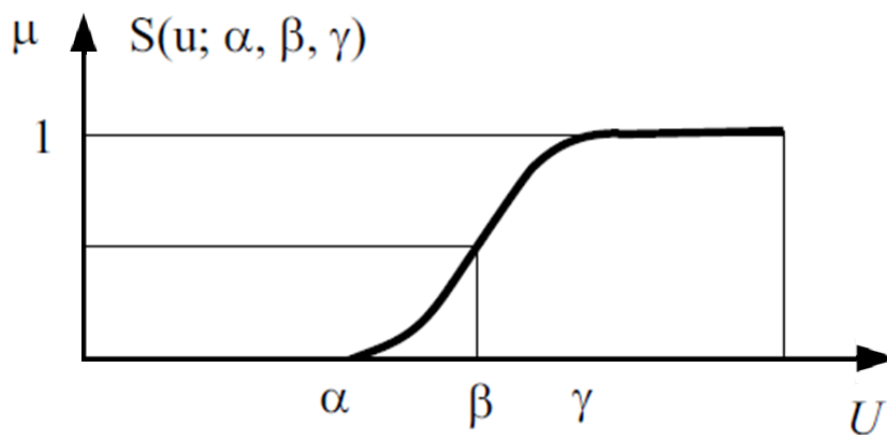


Рисунок 1.6 – График s-функции принадлежности

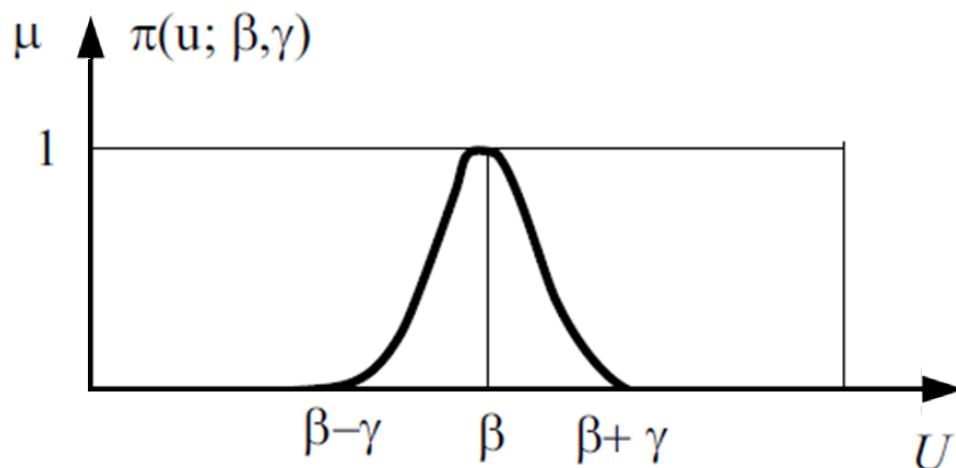


Рисунок 1.7 – График  $\pi$ -функции принадлежности

Еще одной разновидностью функций принадлежности является кусочно-непрерывная полиномиальная функция принадлежности второго порядка ( $L$ - $R$  типа), подробно рассмотренная и введенная в работах [21,22]:

$$\mu(x) = f_L(x) \cdot H(x - S^L) \cdot H(K - x) + f_R(x) \cdot H(x - K) \cdot H(S^R - x), \quad (1.29)$$

где  $H(x)$  - единичная функция Хэвисайда,  $K$  - ядро нечеткого числа с основанием  $[S^L, S^R]$ , а  $f_L(x) = \sum_{i=0}^2 a_i x^i$  и  $f_R(x) = \sum_{i=0}^2 b_i x^i$  - полиномы второго порядка, чьи коэффициенты связаны с характерными точками нечеткого числа  $\langle S^L, K, S^R \rangle$  следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{(S^L)^2}{(S^L - K)^2}; & a_1 &= \frac{-2S^L}{(S^L - K)^2}; & a_2 &= \frac{1}{(S^L - K)^2}; \\ b_0 &= \frac{(S^R)^2}{(S^R - K)^2}; & b_1 &= \frac{-2S^R}{(S^R - K)^2}; & b_2 &= \frac{1}{(S^R - K)^2}. \end{aligned} \quad (1.30)$$

На рисунке 1.8 приведен график данной функции принадлежности.

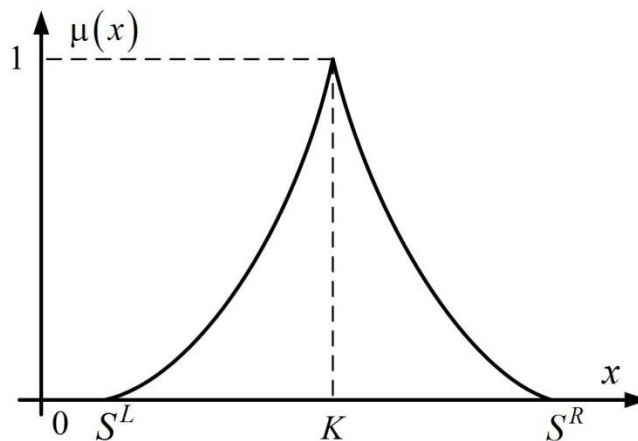


Рисунок 1.8 – График кусочно-непрерывной полиномиальной функции принадлежности второго порядка

## 1.6 Оценка нечетких параметров моделей надежности

В рамках настоящего исследования предлагается рассматривать точечные значения оценки параметров распределений в качестве ядер соответствующих нечётких параметров [23]. В свою очередь, интервальные

оценки с доверительной вероятностью  $(1 - \alpha)$  используются как  $\alpha$ -сечение нечетких параметров. Поскольку получить интервальную оценку при  $\alpha = 0$  невозможно, в качестве носителя нечёткого множества использовалось  $\alpha$ -сечение при наименьшем доступном значении  $\alpha=0,01$  [23].

На рисунке 1.9 приведен типовой результат оценки нечеткого параметра модели надежности.

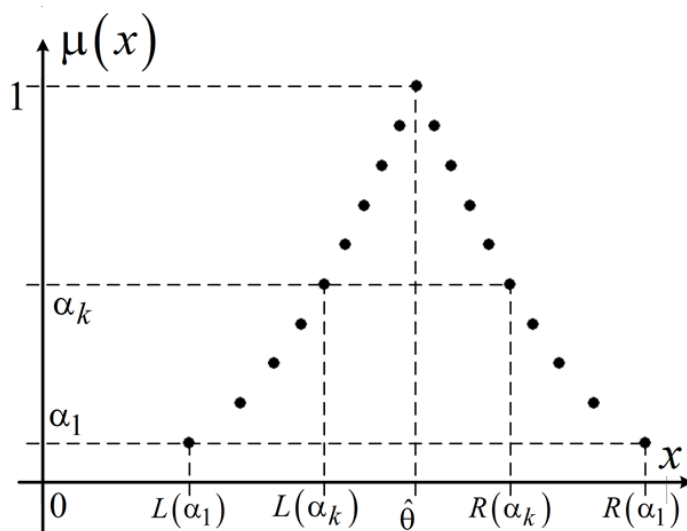


Рисунок 1.9 - Оценка нечеткого параметра модели надежности заданная  $\alpha$ -сечениями

Для получения аналитически заданной функции принадлежности нечеткого параметра можно провести аппроксимацию результата оценки следующей функцией принадлежности, которая была представлена выше (формулы 1.29, 1.30). На рисунке 1.10 представлен результат аппроксимации.

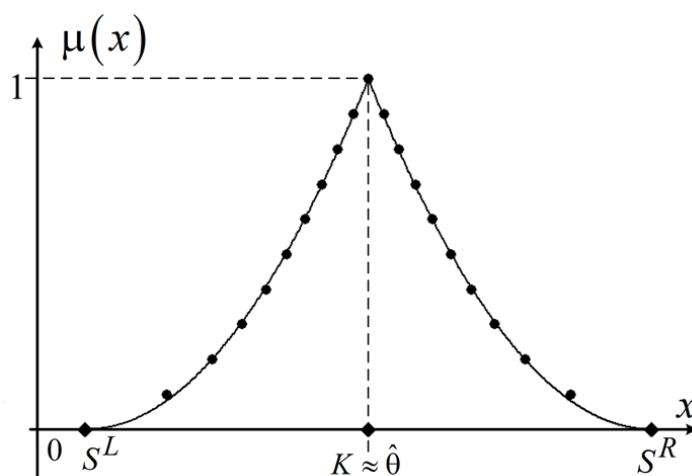


Рисунок 1.10 - Оценка нечеткого параметра модели надежности заданная функциями принадлежности

Результат аппроксимации позволяет однозначно задать нечеткое значение параметра модели надежности в виде аналитического выражения для функции принадлежности. Из рисунка 1.10 видно, что ошибка аппроксимации незначительна. Кроме того, использование функции принадлежности (1.29) позволяет найти более реалистичные границы  $[S^L, S^R]$  основания нечеткого числа, а определение границ его  $\alpha$ -сечений сводится к решению пары квадратных уравнений [21].

## 2 НЕЧЕТКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

В данной главе настоящего исследования рассмотрены нечеткие показатели надежности, а также способы их получения.

### 2.1 Точечная оценка надежности

Первым этапом получения показателей надежности является анализ данных об отказах оборудования либо системы и получения модели надежности исследуемого объекта.

На основе имеющихся данных об отказах, используя формулу (1.1), можно вычислить точечные оценки функции вероятности безотказной работы. Пример вычисления оценок значений функции ВБР с помощью ПП Mathcad приведен на рисунок 2.1.

$$\text{RelP}(\text{Tim}\emptyset) := \left| \begin{array}{l} TT \leftarrow \text{sort}(\text{Tim}\emptyset) \\ \text{for } i \in 0.. \text{last}(\text{Tim}\emptyset) \\ \left| \begin{array}{l} R_{i,0} \leftarrow TT_i \\ R_{i,1} \leftarrow \frac{\text{rows}(\text{Tim}\emptyset) - i - 1}{\text{rows}(\text{Tim}\emptyset)} \end{array} \right. \\ R \end{array} \right.$$

Рисунок 2.1 – Вычисление точечных оценок функции ВБР

На первом шаге программы выполняется сортировка времен отказов  $TT$  по возрастанию. Далее на каждом  $i$ -м шаге в элементу  $R_{i,0}$  присваивается значение времени отказа, а элементу  $R_{i,1}$  присваиваются значения вероятности безотказной работы, с каждым шагом  $i$  ВБР снижается на  $1/N$ , где  $N$  – общее количество отказов (размер выборки). Результатом работы программы является матрица, состоящая из двух векторов – время отказа, значение ВБР.

Дальнейшим шагом является выбор наилучших моделей надёжности, а именно тех моделей, которые точнее бы описывали значения оценки функции ВБР, полученной по выборке. В качестве критериев были использованы критерии согласия Пирсона, Колмогорова и Крамера-Мизеса-Смирнова, рассмотренные в первой главе работы.

В рамках магистерской диссертации, для анализа данных об отказах, в качестве моделей были выбраны J-образное распределение и комплементарное Вейбулл-геометрической распределение Кумарасвами, функции ВБР для которых представлены в формулах (1.9) и (1.12) соответственно.

Встроенная внутренняя функция Maximize в ППП MathCad, основанная на группе методов поиска экстремума функции [24], позволяет решить систему нелинейных дифференциальных уравнений (1.16), полученную с помощью метода максимального правдоподобия. В результате решения системы (1.16) получаем искомые значения параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $a$ ,  $b$  для функции ВБР. (рисунок 2.2).

$$\Lambda(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) := \sum_{i=0}^{\text{rows}(R)-1} \ln(f(R_{i,0}, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5))$$

$$p_1 := 0.9 \quad p_2 := 2 \quad p_3 := 0.0001 \quad p_4 := 0.8 \quad p_5 := 0.5$$

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ a \\ b \end{pmatrix} := \text{Maximize}(\Lambda, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)$$

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.601678605 \\ 3.078880199 \\ 5.63291037 \times 10^{-5} \\ 1.241521245 \\ 0.312597197 \end{pmatrix}$$

$$P(t) := 1 - F(t, \alpha, \beta, \gamma, a, b)$$

Рисунок 2.2 – Пример вычисления коэффициентов для комплементарной Вейбулл-геометрической МН Кумарасвами

Здесь  $\Lambda$  – функция правдоподобия;  $f$  – функция плотности распределения;  $p_{1-5}$  – значения приближенные к искомым параметрам распределения;  $P$  – функция ВБР,  $F$  – функция распределения отказов.

В результате исследований, в качестве примера для построения функций ВБР и интенсивности отказов были использованы две МН, с U-образной функцией интенсивности отказов, детально описанные в первой главе настоящей работы.



Ниже приведены графики функций ВБР согласно различным МН (2.3, 2.4), описывающим произвольный набор данных об отказах.

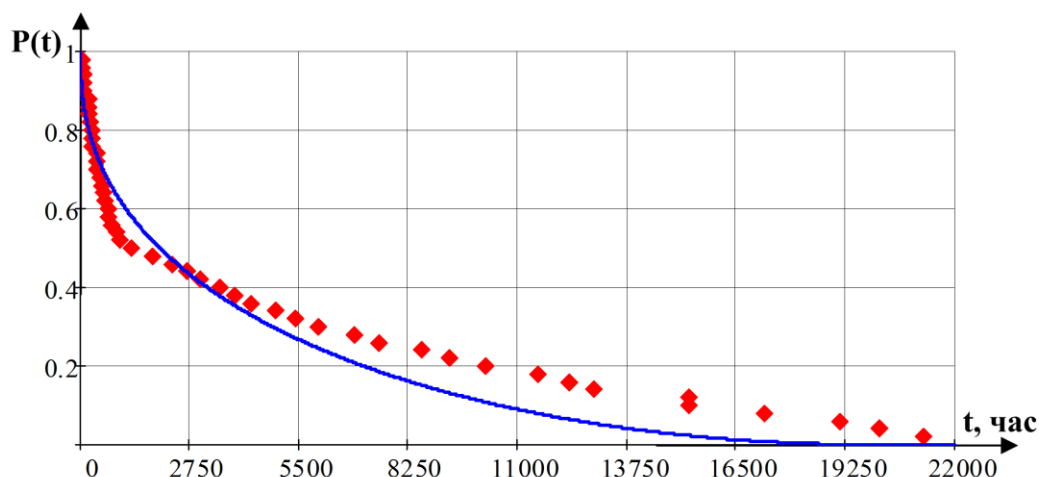


Рисунок 2.3– График функции ВБР для J-образной МН

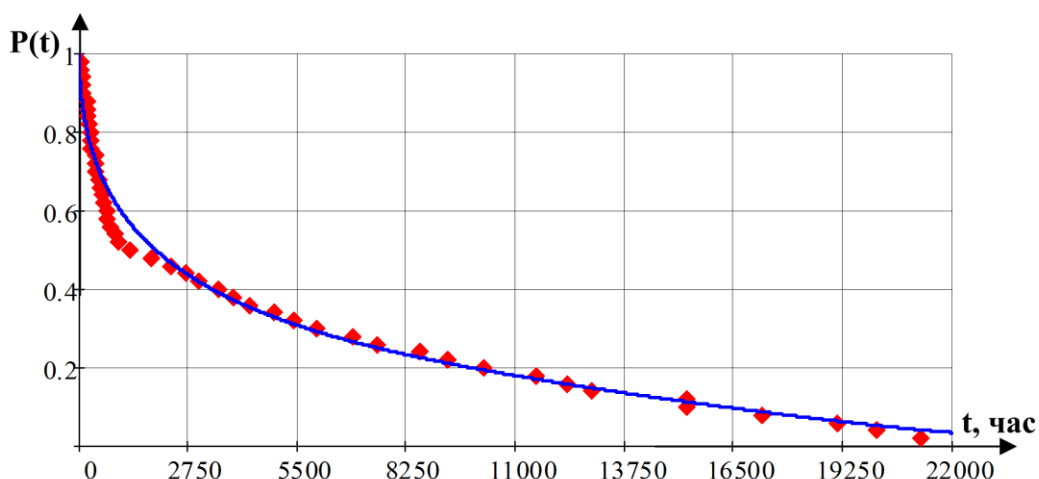


Рисунок 2.4 – График функции ВБР для комплементарной Вейбулл-геометрической МН Кумарасвами

В процессе построения были получены параметры МН, удовлетворяющие условиям, при которых функция интенсивности отказов имеет характерный вид. Подставляя полученные параметры в формулы (1.9) и (1.12) соответственно можно получить функции ВБР для каждой МН. Далее с помощью формулы (1.3) были получены функции интенсивностей отказов для исследуемых МН, графики которых изображены на (рисунках 2.5, 2.6).

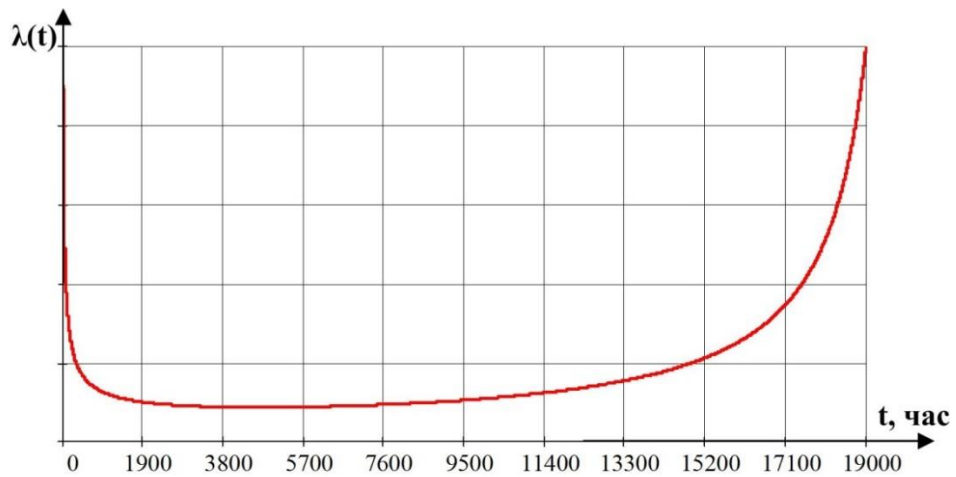


Рисунок 2.5 – График функции интенсивности отказов для J-образной МН

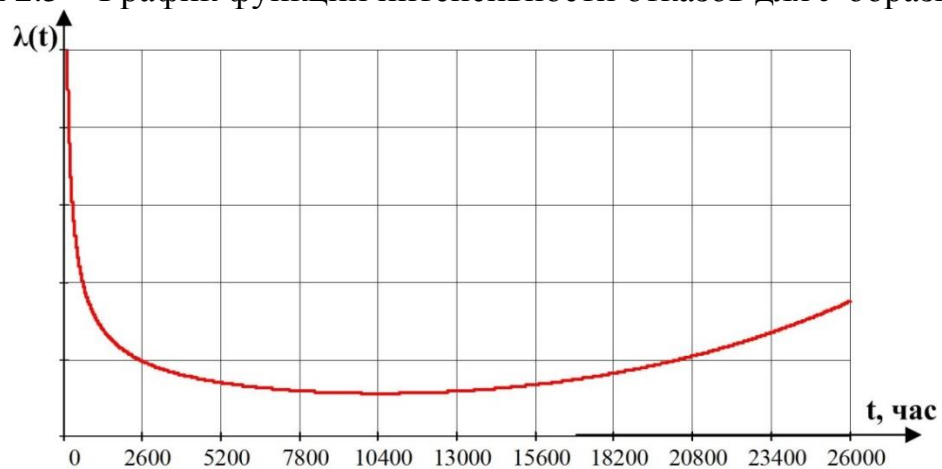


Рисунок 2.6 – График функции интенсивности отказов для комплементарной Вейбулл-геометрической МН Кумарасвами

Обе модели позволили получить характерную форму кривой интенсивности отказов. Дальнейшим шагом исследования является оценка адекватности моделей надежности для анализа данных об отказах. Для каждого набора данных и определенного распределения рассчитываются:

- Значение статистики для критерия согласия Пирсона по формуле (1.19).
- Измеряемое расстояние между эмпирическим и теоретическим распределениями для критерия Колмогорова по формуле (1.20) и значение статистики по формуле (1.22).
- Значение статистики для критерия Крамера-Мизеса-Смирнова по формуле (1.23).

Далее полученные значения статистики сравниваются с табличными величинами, указанными в справочнике [18].

С целью сравнения качества моделей и выбора наилучшей из них, производится расчет информационных критериев  $AIC$ ,  $CAIC$ ,  $BIC$  и  $HQIC$  по формулам (1.25-1.28) соответственно. Наименьшие значения критериев указывают на более подходящую модель.

## **2.2 Получение показателей надежности, принимающих нечёткие значения**

Многие системы работают в условиях неопределённости, связанной с невозможностью точно определить значения параметров функционирования систем или учесть с достаточной точностью изменение факторов внешней среды. При оценке эксплуатационной надежности оборудования по имеющимся данным об отказах зачастую не учитываются факторы, связанные с влиянием изменяющихся условий эксплуатации и режимов работы изделий, систем. В предыдущей части данной главы был рассмотрен анализ данных об отказах, который позволяет выбрать адекватную модель надежности в виде аналитического выражения для ВБР, либо интенсивности отказов. При таком подходе, наработки до отказа идентичного оборудования рассматриваются как случайные числа, принадлежащие одной генеральной совокупности. Однако в процессе эксплуатации различные экземпляры изделий могли испытывать различные нагрузки и эксплуатироваться при разных условиях окружающей среды. Подобные факторы могут оказать как отрицательное, так и положительное влияние на надежность оборудования [25].

Принимая во внимание неопределенность и неполноту сведений об условиях эксплуатации конкретных экземпляров изделий, представляется обоснованным использовать модели надежности, принимающие нечеткие значения [26].

## Способ расчета нечеткой ВБР

Исходными данными для построения функции нечеткой вероятности безотказной работы (ВБР) является массив  $\mathbf{T} = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m\}$  наработок до отказа  $m$  идентичных изделий. Предполагается, что данные изделия эксплуатировались при различных и изменяющихся условиях окружающей среды, и в процессе эксплуатации нагрузка (загруженность) изделий непредсказуемо менялась. Пусть по имеющимся данным получены оценки значений ВБР  $p_i$  в моменты  $\tau_i, i=1..m$  (процесс оценки рассмотрен в п. 2.1). Также, предположим, что для данного изделия была выбрана определенная  $n$ -параметрическая модель надежности  $P(t, \Theta)$ , где  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$  - вектор параметров. Точечные оценки  $\hat{\theta}_j$  значений параметров  $\theta_j, j=1..n$  были получены методом максимального правдоподобия [27]. Для произвольных значений  $0 < \alpha < 1$  получены интервальные оценки параметров  $\theta_j$  с доверительной вероятностью  $(1 - \alpha)$ :

$$I_{\theta_j}(1 - \alpha) = [L_{\theta_j}(\alpha), R_{\theta_j}(\alpha)], \quad (2.1)$$

где  $L_{\theta_j}(\alpha)$  и  $R_{\theta_j}(\alpha)$  - соответственно левая и правая границы доверительного интервала.

Полученные доверительные интервалы рассматриваются как  $\alpha$ -сечения нечетких параметров  $\tilde{\theta}_j$ :

$$\tilde{\theta}_j[\alpha] = I_{\theta_j}(1 - \alpha), \quad (2.2)$$

а точечные оценки  $\hat{\theta}_j$  - как их ядра.[23]

При условии, что получены не менее двух интервальных оценок для каждого из параметров, можно выполнить аппроксимацию имеющихся  $\alpha$ -сечений нечетких параметров с помощью функций принадлежности (1.29).

Таким образом, параметры модели надежности задаются нечеткими числами  $\tilde{\theta}_j = \{(x, \mu_{\theta_j}(x)) \mid x \in \mathfrak{R}\}$  и однозначно определяются своими

характерными точками  $\tilde{\theta}_j = \langle S_{\theta_j}^L, K_{\theta_j}, S_{\theta_j}^R \rangle$ . С учетом этого,  $\alpha$ -сечения нечетких параметров  $\tilde{\theta}_j$  представляют собой интервалы

$$\tilde{\theta}_j[\alpha] = \{x \in \mathfrak{R} \mid \mu_{\theta_j}(x) \geq \alpha\} = [L_{\theta_j}(\alpha), R_{\theta_j}(\alpha)]. \quad (2.3)$$

Образуют двухэлементные множества, содержащие границы этих интервалов:

$$\Psi_{j,\alpha} = \{L_{\theta_j}(\alpha), R_{\theta_j}(\alpha)\}. \quad (2.4)$$

Элементами декартового произведения  $D_\alpha = \Psi_{1,\alpha} \times \Psi_{2,\alpha} \times \dots \times \Psi_{n,\alpha}$  являются кортежи  $d_\alpha = (\psi_{1,\alpha}, \psi_{2,\alpha}, \dots, \psi_{n,\alpha})$ , представляющие всевозможные комбинации из левых и правых границ  $\alpha$ -сечений нечетких параметров  $\tilde{\theta}_j$ .

Тогда функция ВБР  $\tilde{P}(t, \tilde{\Theta})$  с нечеткими параметрами  $\tilde{\Theta} = \{\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \dots, \tilde{\theta}_n\}$  в каждый момент времени  $t^*$  принимает значения из класса нечетких множеств  $\mathcal{F} = \{\tilde{A}\}$ ,  $\tilde{A} = \{(p, \mu_A(p)) \mid p \in [0, 1]\}$ , являющихся нечеткими вероятностями. Границы  $\alpha$ -сечений  $\tilde{P}(t^*, \tilde{\Theta})_\alpha = [L_p(\alpha), R_p(\alpha)]$  нечеткой ВБР в произвольный момент времени  $t^*$  определяются следующим образом: [25]

$$\begin{cases} L_p(\alpha) = \min_{D_\alpha} P(t^*, d_\alpha); \\ R_p(\alpha) = \max_{D_\alpha} P(t^*, d_\alpha). \end{cases} \quad (2.5)$$

### Пример расчета

Для имеющейся J-образной модели надежности, описывающей произвольный набор данных, были получены значение параметров МН для различных доверительных вероятностей. В результате расчетов были получены нечеткие значения для этих параметров  $\tilde{b} = \langle 18000, 20000, 22000 \rangle$ ,  $\tilde{v} = \langle 0.32, 0.42, 0.52 \rangle$ . Функции принадлежности параметров однозначно определяются характерными точками нечетких величин и имеют вид (1.29). Используя выражения (2.3) - (2.5), для каждого момента времени  $i\Delta t$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$

и каждого значения  $k\Delta\alpha, k = 0, 1, 2, \dots, \frac{1}{\Delta\alpha}$  были определены левые и правые границы  $\alpha$ -сечений нечеткой ВБР (значения  $\Delta t, \Delta\alpha$  были заданы заранее). Результатом является трехмерная поверхность в пространстве  $\{t, P, \mu\}$  (рисунки 2.7, 2.8).

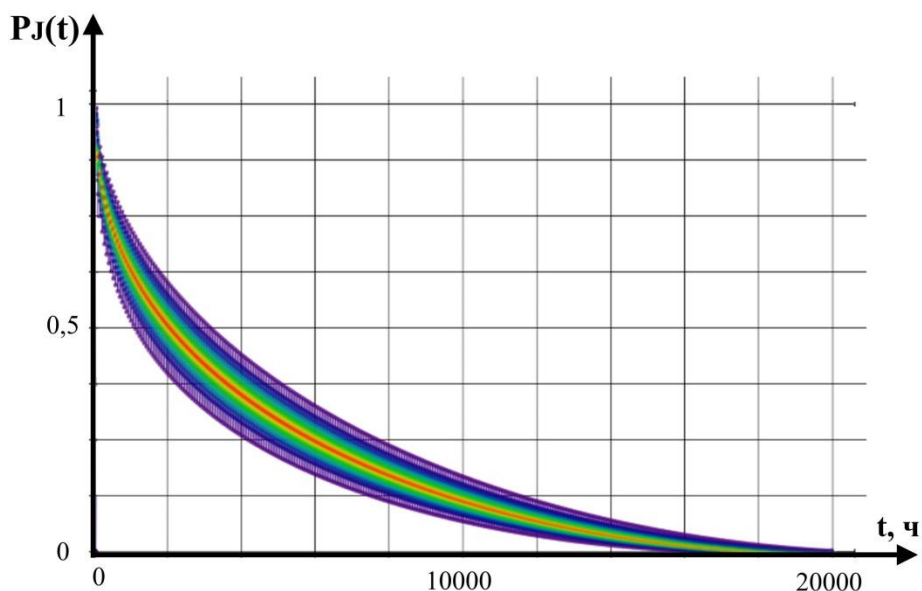


Рисунок 2.7 – График функции ВБР, принимающей нечеткие значения, для J-образной МН (вид сверху)

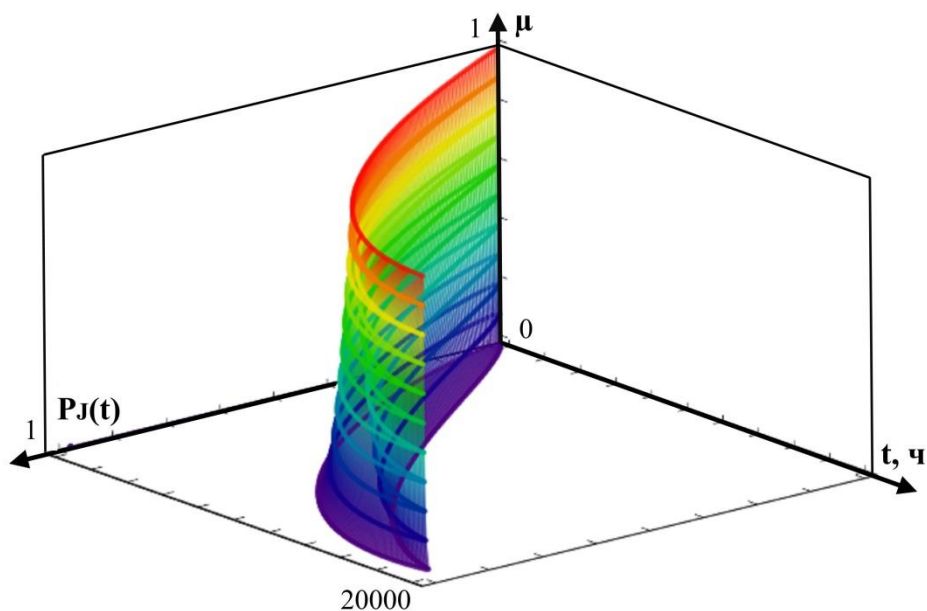


Рисунок 2.8 – График функции ВБР, принимающей нечеткие значения, для J-образной МН (изометрическая проекция)

Процесс получения функции интенсивности отказов  $\tilde{\lambda}(t, \tilde{\Theta})$ , принимающей нечеткие значения параметров аналогичен. Для нечетких значений параметров  $\tilde{b} = \langle 18000, 20000, 22000 \rangle$ ,  $\tilde{v} = \langle 0.32, 0.42, 0.52 \rangle$  результатом является трехмерная поверхность в пространстве  $\{t, \lambda, \mu\}$ , представленная на рисунках 2.9 и 2.10.

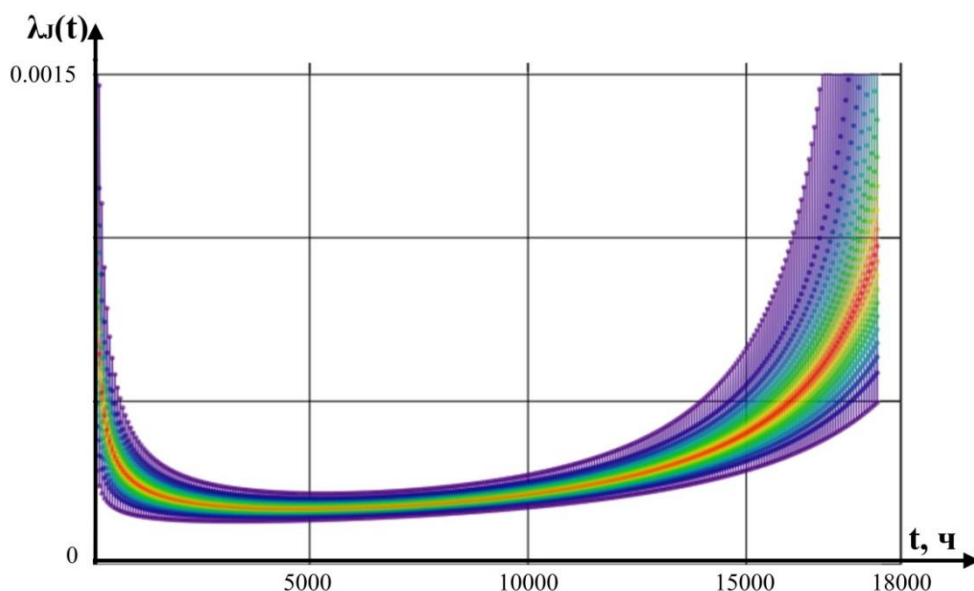


Рисунок 2.9 – График функции интенсивности отказов, принимающей нечеткие значения, для J-образной МН (вид сверху)

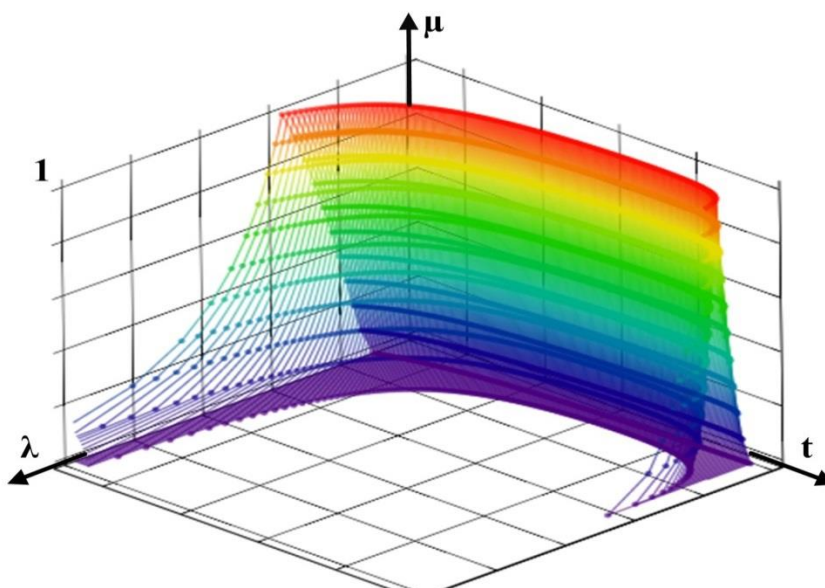


Рисунок 2.10 – График функции интенсивности отказов, принимающей нечеткие значения, для J-образной МН (изометрическая проекция)

Результатом сечения графика функции ВБР, принимающей нечеткие значения, перпендикулярно оси  $P(t)$  является нечеткое значение времени. Нечеткое значение вероятности безотказной – это результат сечения данного графика перпендикулярно оси  $t$ . Нечеткое значение ИО может быть получено путем сечения графика, изображенного на рисунках 2.9 и 2.10, вдоль оси  $\lambda(t)$ .

### **3 ПОЛУЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ, ПРИНИМАЮЩИХ НЕЧЕТКИЕ ЗНАЧЕНИЯ, ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА**

В данной главе магистерской диссертации приведено описание объектов исследований – задвижки с электроприводом и блоком управления (БУ), и участков трубопроводов. Также в главе приводится описание применимости аппарата нечетких множеств в расчете надежности на примере оборудования, применяемого в дочерних общества «НК «Роснефть».

#### **3.1 Описание объектов исследования**

##### **Запорная арматура с электроприводом и блоком управления**

Объект исследования представляет собой сложную систему (СС), состоящую из трех основных компонентов:

- 1) Задвижка клиновая;
- 2) электропривод многооборотный;
- 3) блок управления.

Задвижка – это элемент системы, предназначенный для управления потоком среды, путем частичного или полного перекрытия проходного сечения трубопроводов. [28]

Основываясь на опыте эксплуатации можно отметить, что в рамках системы задвижка-привод-БУ, запорная арматура является самым ненадежным компонентом. Механизмы достаточно часто выходят из строя, т.к. подвержены быстрому износу, в связи с постоянными трениями деталей. Кроме того, характеристики данного компонента, заявленные заводом изготовителем, не



всегда соответствуют истине, в результате чего запорная арматура (ЗА) ломается под действием момента нагрузки со стороны привода на ЗАКРЫТИЕ. Можно выделить следующие усредненные технические характеристики для различных марок, но одного типа задвижек, применяемых в «НК «Роснефть», определяющие требования к надежности данного компонента системы:

- Среднее время наработки на отказ не менее 16000 часов, при условии не превышения установленных значений ресурса и режимов работы.

- Назначенный ресурс составляет не менее 6000 циклов на ОТКР-ЗАКР-ОТКР, при условии не превышения установленных значений времени эксплуатации и режимов работы.

- Температурный режим: от +37 до -55 °С.

Электропривод – устройство, служащее для автоматизации трубопроводной арматуры. Используется для дистанционного управления арматурой, определения ее положения и диагностики [29].

Электрический привод – электромеханическое устройство, которое является достаточно сложным в плане конструктивного исполнения. По опыту эксплуатации можно утверждать, что привод, установленный на ЗА, является в среднем в 1.8-2 раза надежнее самой арматуры. Но детали приводов также достаточно сильно подвержены износу, поэтому они нуждаются в тщательном и регулярном обслуживании и уходе. Можно выделить следующие усредненные технические характеристики для различных марок однотипных электроприводов, применяемых в Компании, определяющие требования к надежности данного компонента системы:

- Среднее время наработки на отказ не менее 30000 часов, при условии не превышения установленных значений ресурса и режимов работы.

- Назначенный ресурс составляет не менее 10000 циклов на ОТКР-ЗАКР-ОТКР при условии не превышения установленных значений времени эксплуатации и режимов работы.

- Температурный режим: от +37 до -55 °С.

Блок управления – устройство, предназначенное для управления электроприводом [30].

В рамках сложной системы БУ – электронно-вычислительное устройство, является самым надежным компонентом. В основном отказы блока управления связаны с ошибками при пуско-наладочных работах. Причины возникновения таких отказов полностью устраняются на первых этапах эксплуатации. Можно выделить следующие усредненные технические характеристики для различных марок, но одного типа блоков управления, применяемых в Компании, определяющие требования к надежности данного компонента системы:

- Среднее время наработки на отказ не менее 60000 часов, при условии не превышения установленных значений ресурса и режимов работы.
- Температурный режим: от +38 до -40 °С.

В рамках настоящего исследования расчет показателей надежности для ЗА с электроприводом и блоком управления проводится на сгенерированном наборе данных об отказах. Данные по отказам каждого компонента системы были получены путем оценки опыта эксплуатации данного оборудования и анализа информации по нормативным техническим характеристикам (ТХ) компонентов систем, применяемых в «НК «Роснефть». Для анализа использовались лишь те ТХ, которые были подтверждены специалистами, занимающимися эксплуатацией данного оборудования.

Оценить надежность компонентов исследуемой сложной системы можно, как, отталкиваясь от выработанного ресурса на отказ (в циклах для ЗА и электроприводов), так и от времени наработки на отказ (для всех компонентов системы). Допустимый диапазон температурного режима для БУ не является широким. Однако случаи эксплуатации блоков управления вне допустимого диапазона встречаются достаточно редко, в связи с использованием современных систем обогрева. Учитывая все выше перечисленное, в рамках настоящего исследования, расчет надежности проводился от времени, при этом

за нечеткое значение был взят выработанный ресурс на отказ (в циклах), как для задвижек, так и для электрических приводов.

Данное исследование проводится с целью получения показателей надежности, принимающих нечеткие значения, в зависимости от выработанного ресурса. В дальнейшем аналогичные подходы к оценке реальных данных помогут определить совместную степень влияния времени эксплуатации и наработанного ресурса на надежность сложной системы: задвижка-привод-БУ.

### **Участки трубопроводов**

Трубопроводы составляют большую часть основных производственных фондов, вследствие чего, около 90% отказов приходится именно на трубопроводы. Вопрос поиска надежных и оптимальных решений в области организации трубопроводного транспорта является одним из самых важных в «НК «Роснефть». Информация об отказах трубопроводного транспорта с трудом подвергается детальному анализу, т.к. существует множество факторов, оказывающих влияние на надежность данного вида оборудования.

В рамках данной работы, объектами исследований являются участки трубопроводного транспорта с аналогичными характеристиками (диаметр, толщина стенки, материал, протекающая среда – водонефтяная эмульсия). Характеристики объекта представлены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1. Характеристики исследуемых трубопроводов

Диаметр, мм	Толщина, мм	Материал	Среда	Способ прокладки	Глубина заложения
114	9	Сталь 20	ВНЭ	Подземный	1.5

Способ прокладки трубопроводов – подземный, поэтому воздействие внешних факторов незначительно [31]. Все анализируемые отказы участков трубопроводов связаны с внутренней коррозией. Предполагается, что на надежность объекта в данном случае оказывают влияние только характеристики протекающей среды (водонефтяной эмульсии - ВНЭ).

Давление, количество протекающей жидкости в сутки, обводненность ВНЭ постоянно меняются, поэтому можно сказать, что одинаковые по своим характеристикам участки трубопроводов эксплуатируются в различных режимах. В связи с этим, в рамках настоящего исследования рассматривается применимость математического аппарата нечетких множеств, с целью получения показателей надежности трубопроводов, принимающих нечеткие значения. Нечеткость параметров напрямую связана с неопределенными, изменяющимися характеристиками протекающей среды.

### **3.2 Сбор информации об отказах**

Процесс сбора данных об отказах оборудования, его режимах работы и условиях функционирования полностью автоматизирован. В этом процессе принимают участие четыре взаимосвязанных между собой системы: [32]

1. распределенная система управления (PCY);
2. система технического обслуживания и ремонта (CTOиP);
3. комплексная информационно-управляющая система (КИУС).

PCY - система управления технологическим процессом, отличающаяся построением распределённой системы ввода-вывода и децентрализацией обработки данных.

CTOиP – система планирования, подготовки и реализации технического обслуживания и ремонтов с заданными регламентами по виду и периодичности. Системы TOиP содержат в себе нормативы по видам и периодичности проводимых ремонтов для каждой единицы оборудования. Кроме того в систему вносится вся информация о проведенных технических обслуживаниях и ремонтах.

КИУС (система MES-уровня) – специализированное прикладное программное обеспечение, предназначенное для решения задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации процессов производства.

Структурная схема сбора данных об отказах представлена на рисунке 3.1.

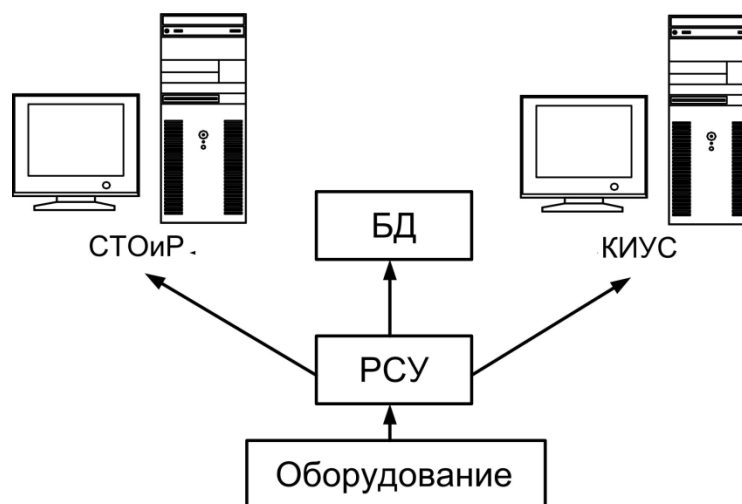


Рисунок 3.1 – Структурная схема сбора информации об отказах

Распределенные системы управления (PCU) фиксируют отказы всех интегрированных приборов КИПиА, подключенных по HART протоколу, и оборудования, подключенного по сети Ethernet либо интерфейсу RS-485. Далее информация об отказах передается на MES-уровень и в систему ТОиР, где фиксируется в соответствующих базах данных. В свою очередь из системы КИУС можно извлечь необходимую информацию об условиях функционирования оборудования (температура, влажность). В базах данных PCU хранится информация о показаниях приборов и режимах работы оборудования.

Современные автоматизированные методы сбора данных совместно с основными методами защиты информации, применяемыми в Компании, позволяют свести к нулю фальсификацию либо утаивание какой-либо информации об отказах. В основном это связано с автоматизированной передачей информации об отказе непосредственно в КИУС. Система оповещает руководителей структурных подразделений о нештатной ситуации. В свою очередь работники обязаны в установленные сроки внести запись в СТОиР о причине поломки или отказа изделия.

В рамках данной работы, с целью сбора данных об отказах запорной арматуры и электрических приводов из баз данных производственных площадок дочерних обществ «НК «Роснефть», были составлены типовые формы предоставления информации (таблицы 3.2-3.8).

В таблице 3.2 отражается полный перечень электроприводов и пневмоприводов, находящихся в эксплуатации на конкретном объекте.

Таблица 3.2. Перечень приводов в эксплуатации

Инд. № *	Тип привода	Марка привода	Дата ввода в эксплуатацию	Инд. № ЗРА**

*Примечания:*

\* произвольная комбинация чисел, каждый номер индивидуален. Если отказ привода привел к его полной замене, то индивидуальный номер должен иметь приписку, пример: 222\_1 – привод, который был введен в эксплуатацию вместо 222;

\*\* индивидуальный номер запорной арматуры, на которую установлен привод.

В таблице 3.3 отражаются полный перечень отказов электроприводов и пневмоприводов с кратким описанием (причина отказа, тип, вид неисправности или ошибки).

Таблица 3.8. Данные об отказах приводов

Инд. № *	Дата отказа	Описание

В таблице 3 отражаются полный перечень управляющих команд на открытие/закрытие, которые были выполнены приводом за весь период эксплуатации. Данная информация необходима для определения выработанного ресурса приводом на отказ.

Таблица 3.4. Выполненные команды

Инд. № *	Выполненная команда	Время и дата

С целью исключения из анализа информации об отказах, которые были предотвращены, необходима также информация по всем видам ТО, которые были проведены (Таблица 3.5).

Таблица 3.5. Информация по техническому обслуживанию

Инд. № *	Дата проведения ТО	Вид ТО	Описание ТО

В таблице 3.6 отражается полный перечень запорной арматуры, находящейся в эксплуатации на конкретном объекте Компании.

Таблица 3.6. Перечень запорной арматуры в эксплуатации

Инд. №	Тип изделия	Марка изделия	Дата ввода в эксплуатацию	Инд. № трубопровода*

*Примечание: \* индивидуальный номер участка трубопровода, на котором установлена запорная арматура.*

В таблице 3.7 отражаются полный перечень отказов запорной арматуры с кратким описанием (причина отказа, тип, вид неисправности или ошибки).

Таблица 3.7. Данные об отказах ЗА

Инд. №	Дата отказа	Описание

В таблице 3.8 отражается информация по всем видам технического обслуживания запорной арматуры за весь срок эксплуатации.

Таблица 3.8. Информация по техническому обслуживанию

Инд. №	Дата проведения ТО	Вид ТО	Описание ТО

### **3.3 Расчет показателей надежности для задвижки с электроприводом и блоком управления**

Для электрического привода и запорной арматуры данные об отказах представляют собой информацию о времени отказа и ресурса наработки на отказ (количество циклов на ОТКР-ЗАКР-ОТКР), для блока управления – информацию о временах отказов. Данные сведены в таблицы А.1 и А.2 для электропривода и задвижки соответственно. Данные об отказах для блока управления находятся в таблице А.3.

Электроприводная арматура является сложной системой, состоящей из трёх различных основных компонентов. Каждый из компонентов нуждается в индивидуальном подходе при диагностике, техническом обслуживании, ремонте и планировании мероприятий по повышению надежности. В связи с этим, важным мероприятием по повышению надежности всей системы является расчет информативных показателей надежности каждого ее компонента.

В процессе анализа данных об отказах объекта исследования, удалось выяснить, что на надежность блока управления ресурс наработки электроприводной арматуры не оказывает особого влияния. Кроме того, было установлено, что БУ является самым надежным компонентом системы. Поэтому в рамках настоящего исследования для блока управления была рассчитана только классическая функция ВБР. Для других компонентов – электропривода и задвижки, были получены показатели надежности (функции ВБР и ИО), принимающие нечеткие значения.

Для электропривода и задвижки были построены гистограммы распределения отказов привода и запорной арматуры для различных интервалов выработанного ресурса на отказ (рисунки 3.3 и 3.4). Интервалы для привода: 0-2500...15000-17500; для запорной арматуры: 0-1500...9000-10500.. Для каждого столбца гистограммы также было определено значение функции принадлежности.

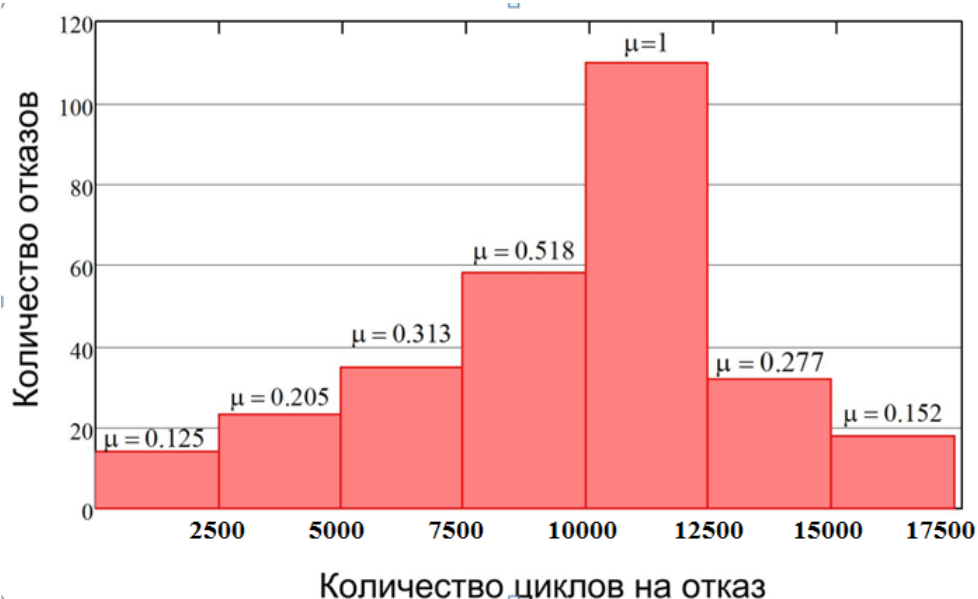


Рисунок 3.3 – Гистограмма плотности распределения отказов электропривода



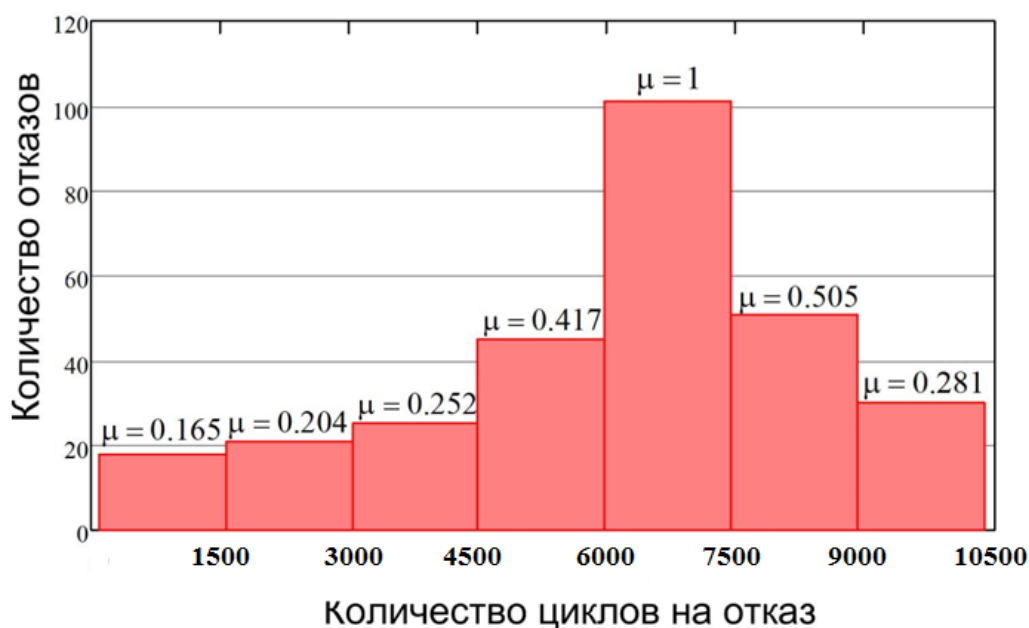


Рисунок 3.4 – Гистограмма плотности распределения отказов задвижки

Каждому отказу из интервала количества циклов на отказ соответствует определенное время отказа (таблицы А.1 и А.2). Массив времен отказов для электропривода можно обозначить как  $T_E = T_1, T_2, \dots, T_7$ , где  $T_i$  - вектор времен для  $i$  – го столбца.

В рамках работы предполагается, что модель надежности, оценивающая времена отказов, не зависит от того, в какой интервал гистограммы попало значение выработанного ресурса на отказ. Поэтому для выборки  $T_5$  с функцией принадлежности  $\mu = 1$  проверялась адекватность моделей надежности Kw-CWG и J-shaped, формулы функций ВБР для которых (1.9 и 1.12) соответственно.

Решая систему дифференциальных уравнений (1.15), полученную с помощью ММП, были вычислены точечные оценки значений параметров функций ВБР  $\hat{\Theta}_J$  и  $\hat{\Theta}_{KwCWG}$ , которые находятся в таблице Г.1.

На рисунках 3.5, 3.6 приведены графики функций ВБР для моделей надежности Kw-CWG и J-shaped, описывающие данные об отказах электропривода.

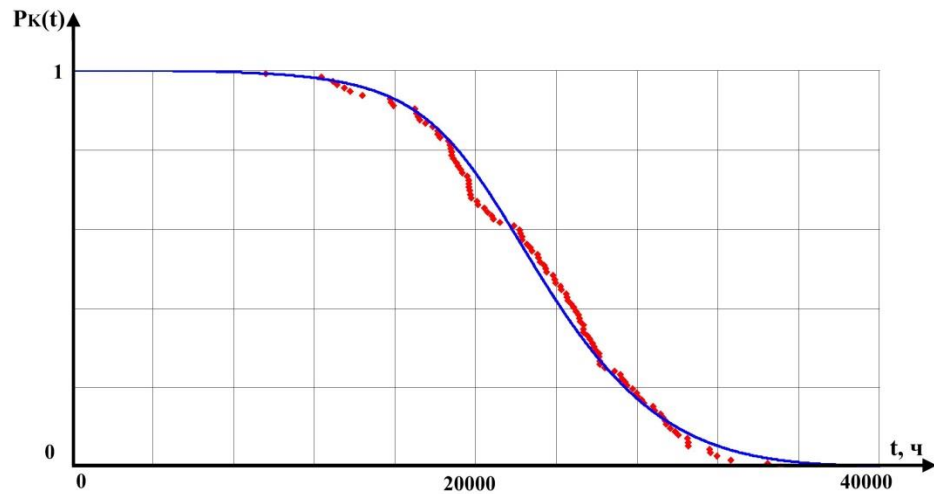


Рисунок 3.5 – График функции ВБР для комплементарной Вейбулл-геометрической МН Кумарасвами (отказы электропривода)

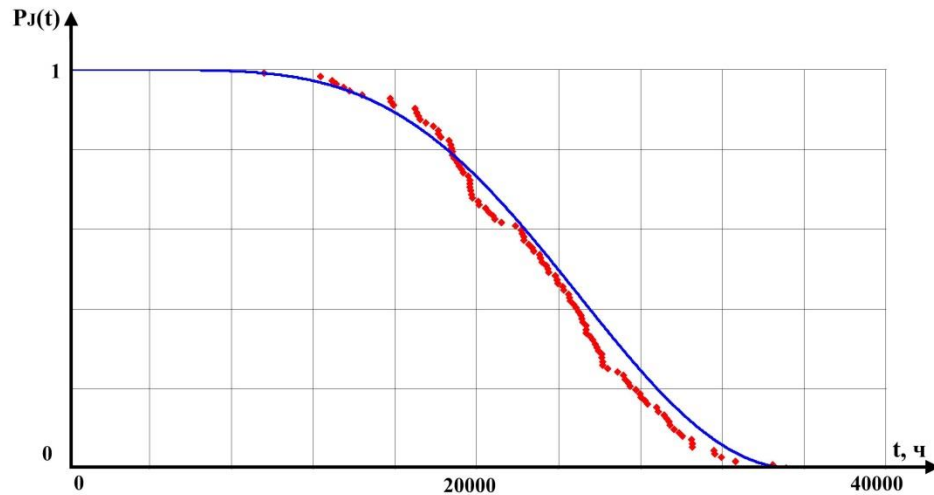


Рисунок 3.6 – График функции ВБР для J-образной МН (отказы электропривода)

Далее, на основе полученных результатов и выборок отказов, были рассчитаны значения статистик для критериев согласия Пирсона, Колмогорова и Крамера-Мизеса-Смирнова по формулам (1.19, 1.22, 1.23) соответственно. Результаты показали, что обе модели являются адекватными для оценки данных об отказах (таблица Г.1.). С целью определения более подходящей модели, были рассчитаны информационные критерии  $AIC$ ,  $CAIC$ ,  $BIC$  и  $HQIC$  по формулам (1.25-1.28) соответственно. Значения информационных критериев указывают на то, что более подходящей моделью для оценки данных об отказах электрического привода является модель надежности Kw-CWG.

Аналогичным образом были вычислены значения параметров моделей надежности Kw-CWG и J-shaped, описывающие данные об отказах задвижки (таблица Г.1). Графики функций ВБР для МН Kw-CWG и J-shaped представлены на рисунках 3.7, 3.8.

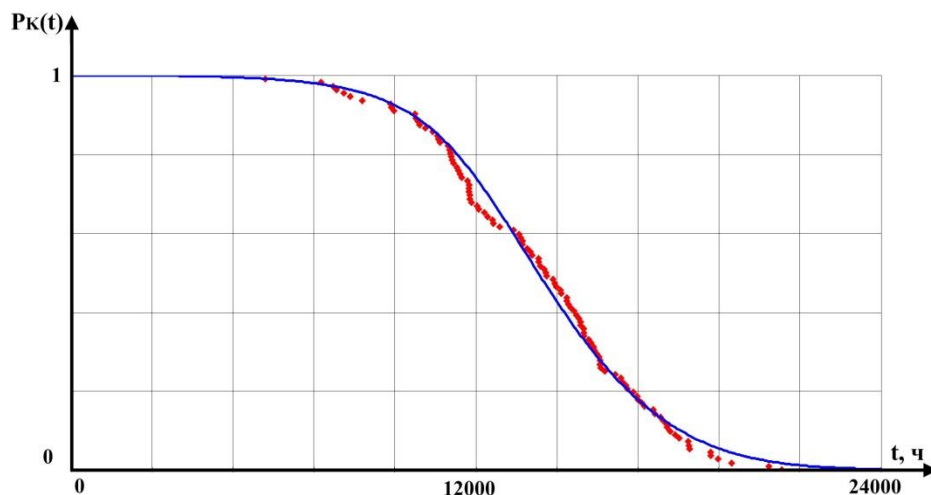


Рисунок 3.7 – График функции ВБР для комплементарной Вейбулл-геометрической МН Кумарасвами (отказы задвижки)

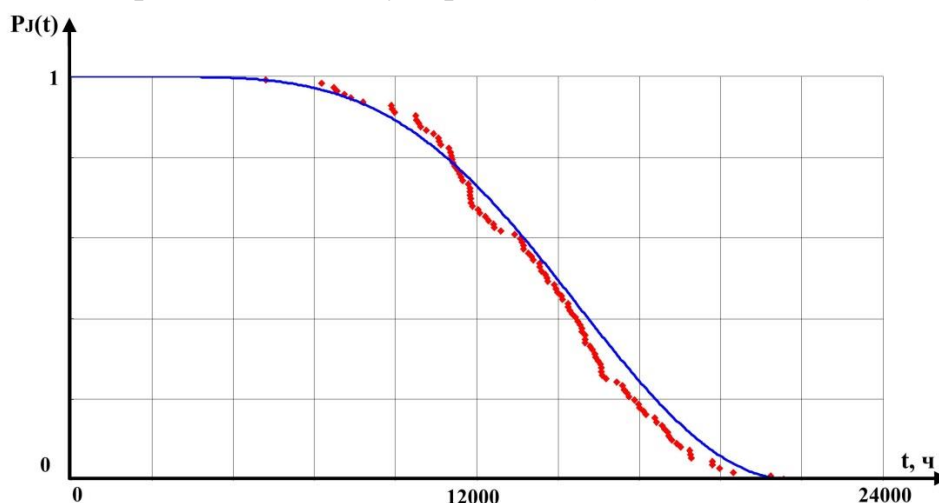


Рисунок 3.8 – График функции ВБР для J-образной МН (отказы задвижки)

Значения статистик критериев согласия, рассчитанных по формулам (1.19, 1.22, 1.23), показали, что обе модели являются адекватными для оценки. Информационные критерии, рассчитанные по формулам (1.25-1.28) соответственно указывают на то, что более подходящей моделью для оценки данных об отказах задвижки является модель надежности Kw-CWG.

На следующем шаге были определены  $\hat{\Theta}_{KCWG}$  для других шести интервалов из каждой гистограммы (рис. 3.3 и 3.4). Значения параметров сведены в таблицы Б.1 и В.1 для электропривода и ЗА соответственно. На рисунках 3.9 и 3.10 представлены графики функций ВБР всех выборок для электропривода и задвижки соответственно.

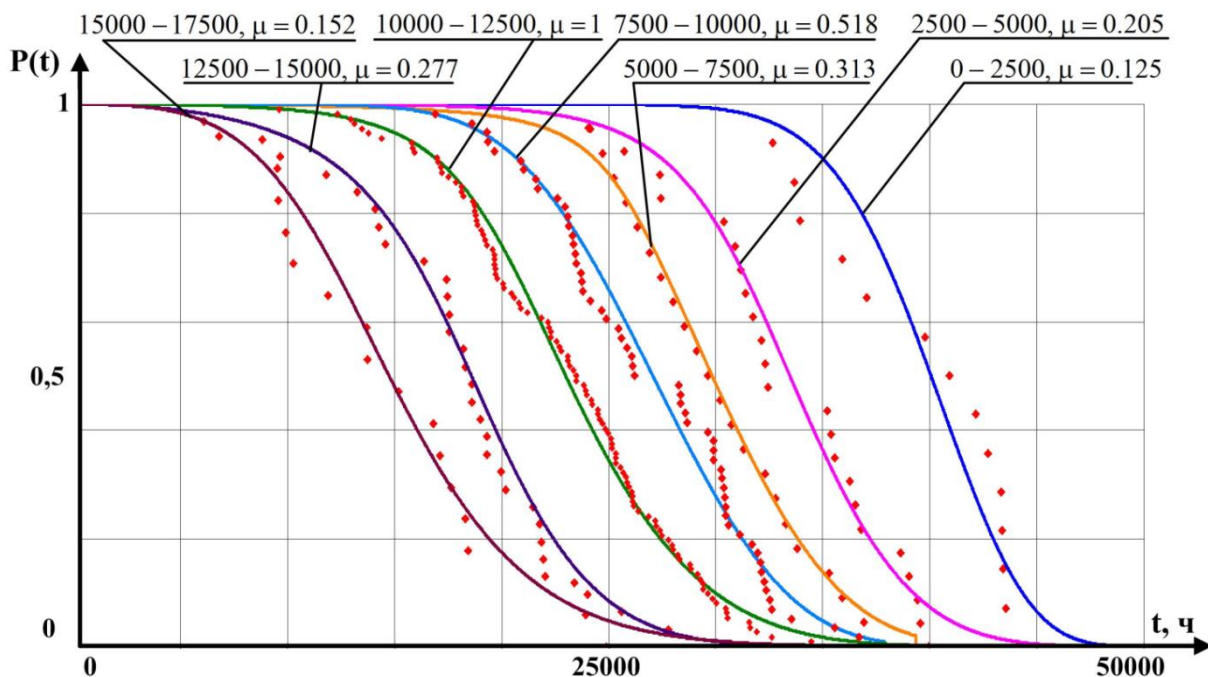


Рисунок 3.9 – Графики функций ВБР для различных выборок отказов электропривода

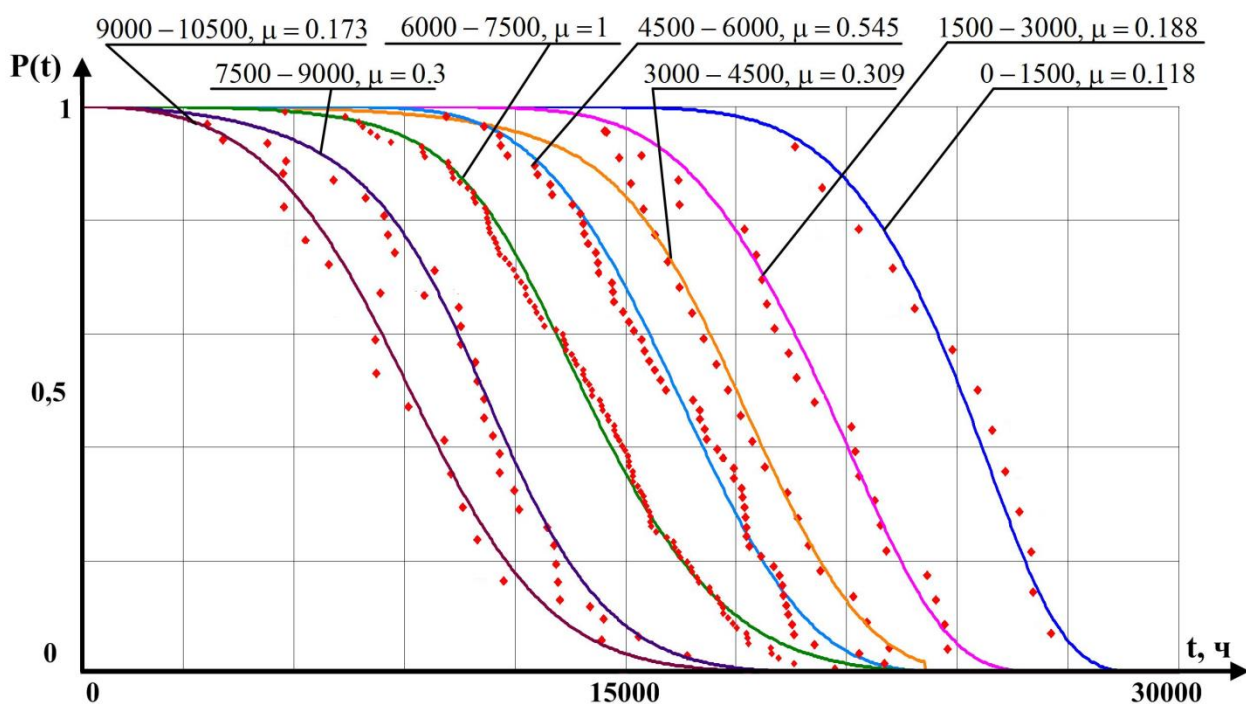


Рисунок 3.10 – Графики функций ВБР для различных выборок отказов задвижки

На основе точечных значений параметров моделей надежности и значений функций принадлежности для каждого  $\alpha$ -уровня, были построены функции ВБР электропривода и задвижки, принимающие нечеткие значения в каждый момент времени (рисунки 3.11-3.14).

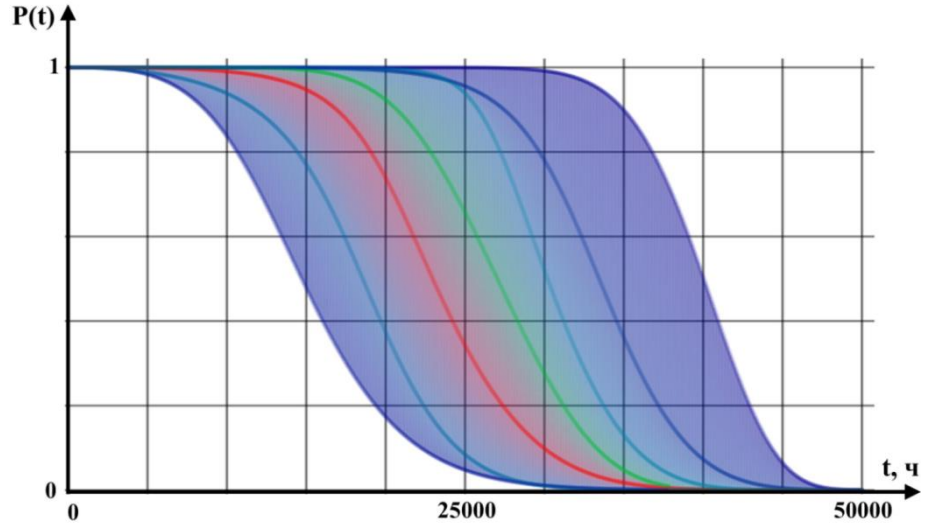


Рисунок 3.11 – Внешний вид функции ВБР электропривода, принимающей нечеткие значения (вид сверху)

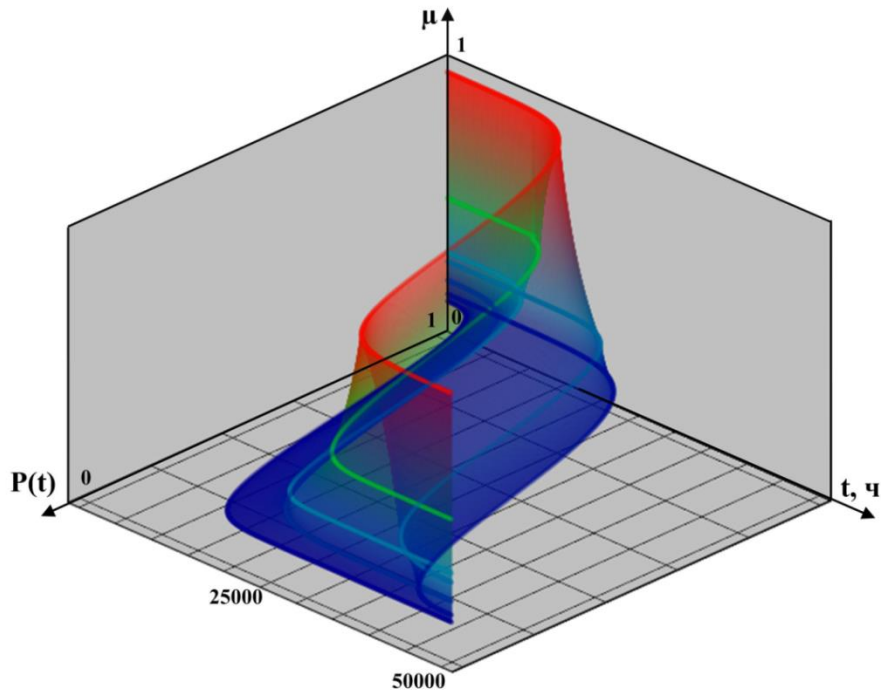


Рисунок 3.12 – Внешний вид функции ВБР электропривода, принимающей нечеткие значения (изометрическая проекция)

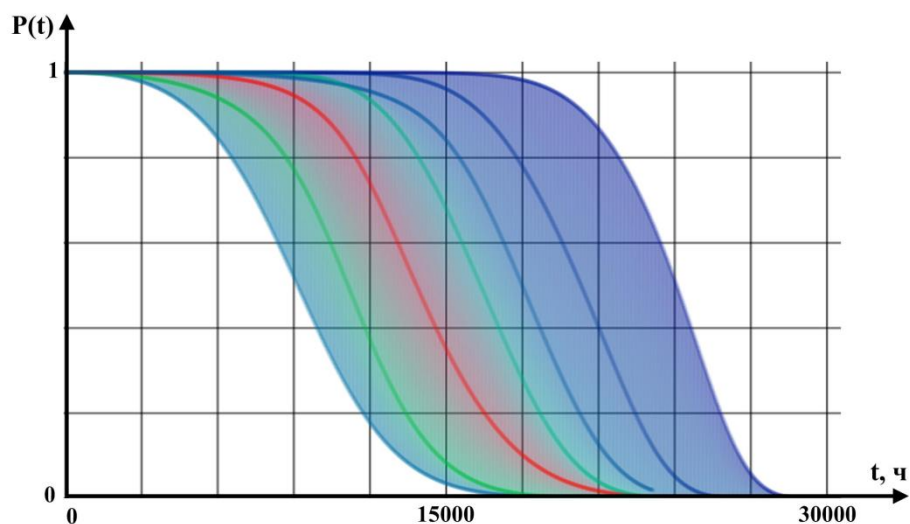


Рисунок 3.13 – Внешний вид функции ВБР задвижки, принимающей нечеткие значения (вид сверху)

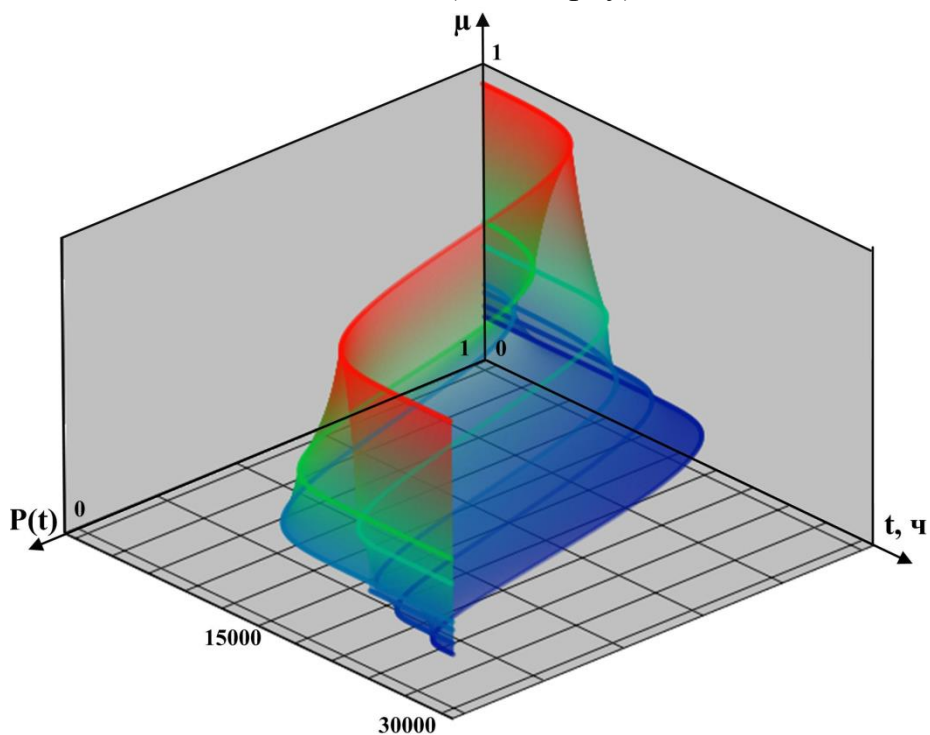


Рисунок 3.14 – Внешний вид функции ВБР задвижки, принимающей нечеткие значения (изометрическая проекция)

Аналогичным способом, используя формулу (1.3), были получены функции интенсивностей отказов, принимающие нечеткие значения. Графики функций ИО изображены на рисунках 3.15 - 3.18.



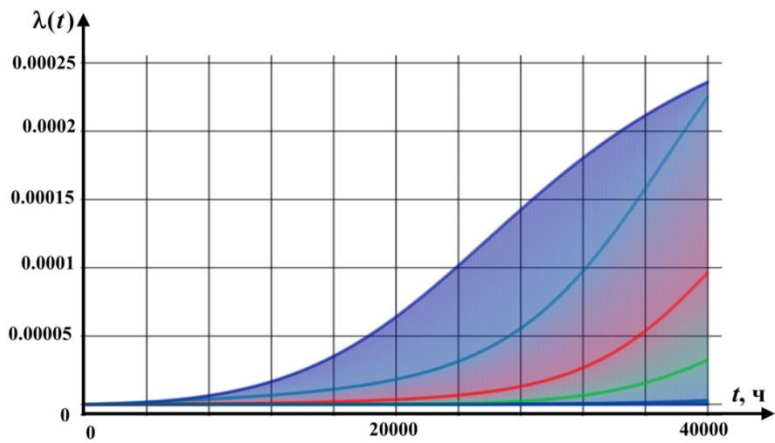


Рисунок 3.15 – График функции ИО электроприводов, принимающей нечеткие значения (вид сверху)

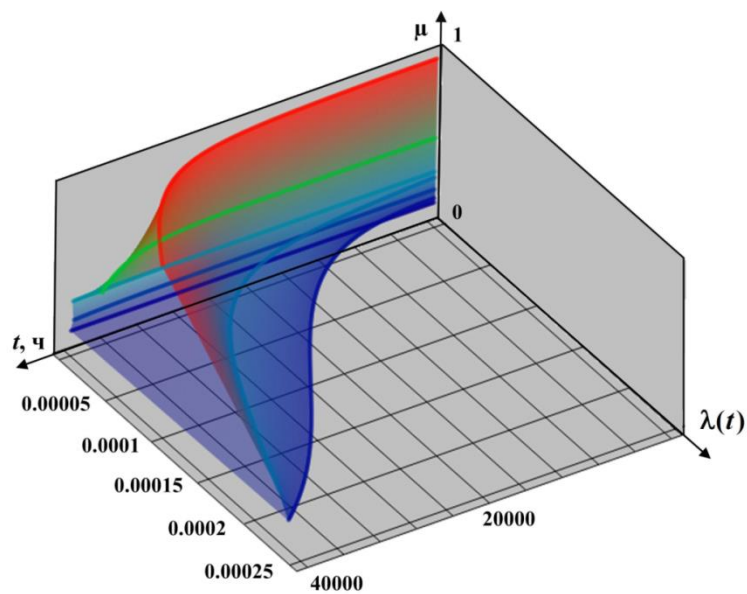


Рисунок 3.16 – График функции ИО электроприводов, принимающей нечеткие значения (изометрическая проекция)

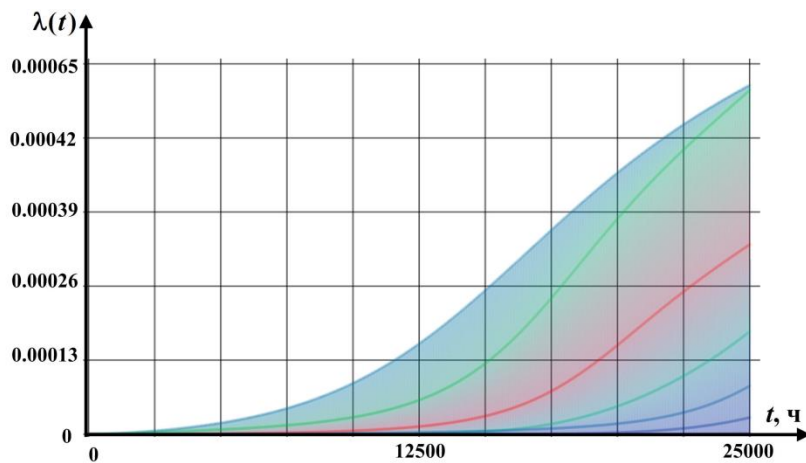


Рисунок 3.17 – График функции ИО завдвигек, принимающей нечеткие значения (вид сверху)

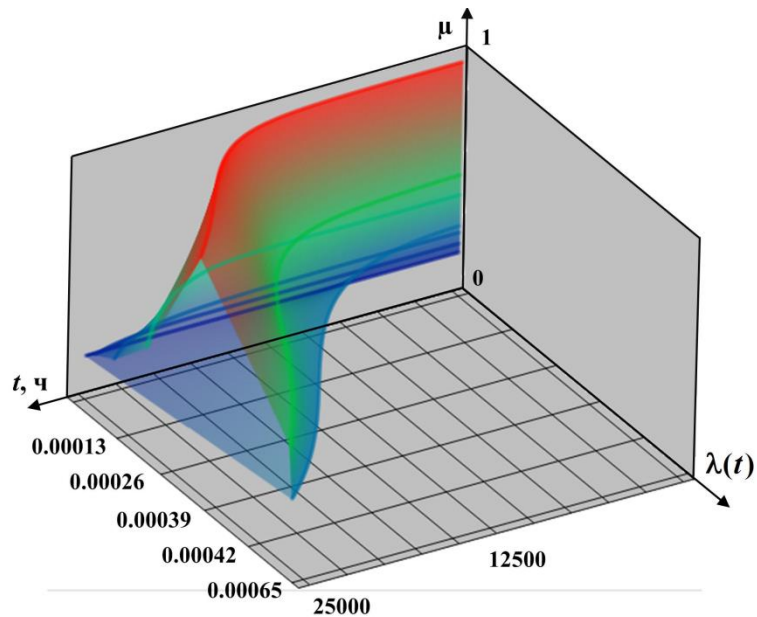


Рисунок 3.18 – График функции ИО задвижек, принимающей нечеткие значения (изометрическая проекция)

Результатом сечения графика функции ВБР, принимающей нечеткие значения, перпендикулярно оси  $P(t)$  является нечеткое значение времени. Нечеткое значение вероятности безотказной – это результат сечения данного графика перпендикулярно оси  $t$ . На рисунках 3.19 и 3.20 изображены сечения графика функции ВБР, нечеткие значения времени и вероятности безотказной работы для электропривода и задвижки соответственно.

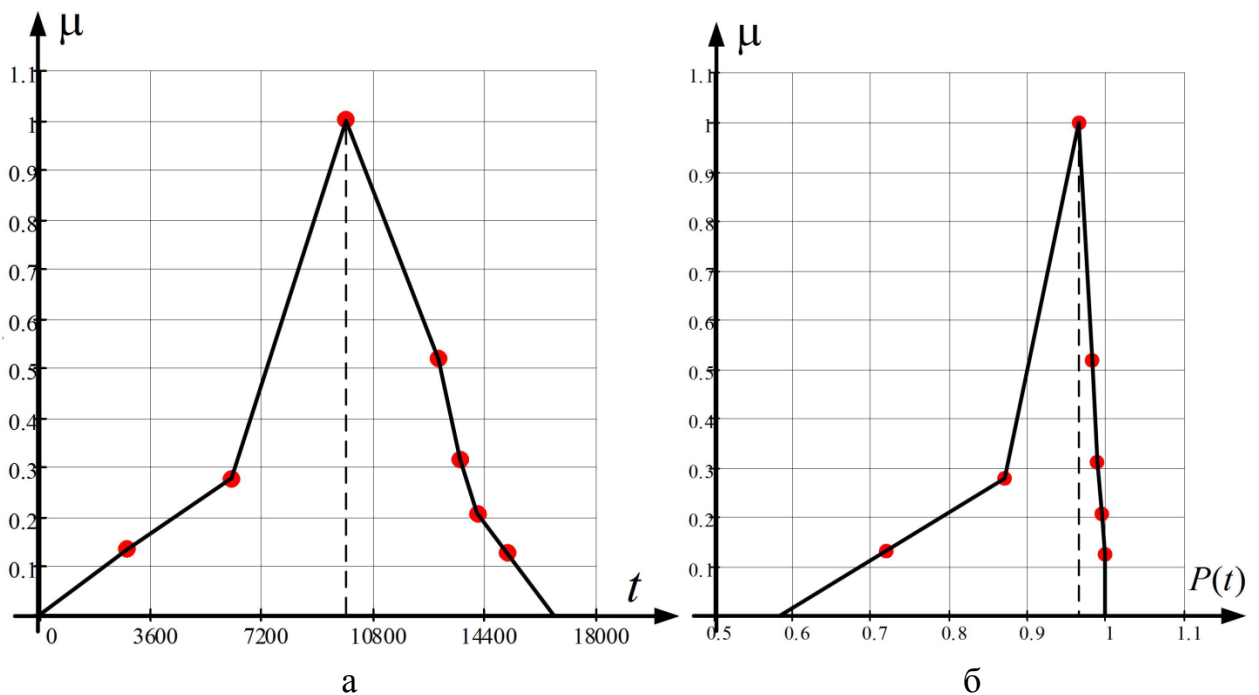


Рисунок 3.19 – Результаты сечений графика функции  $P(t)$  электропривода



(а – нечеткое значение времени, б – нечеткое значение ВБР)

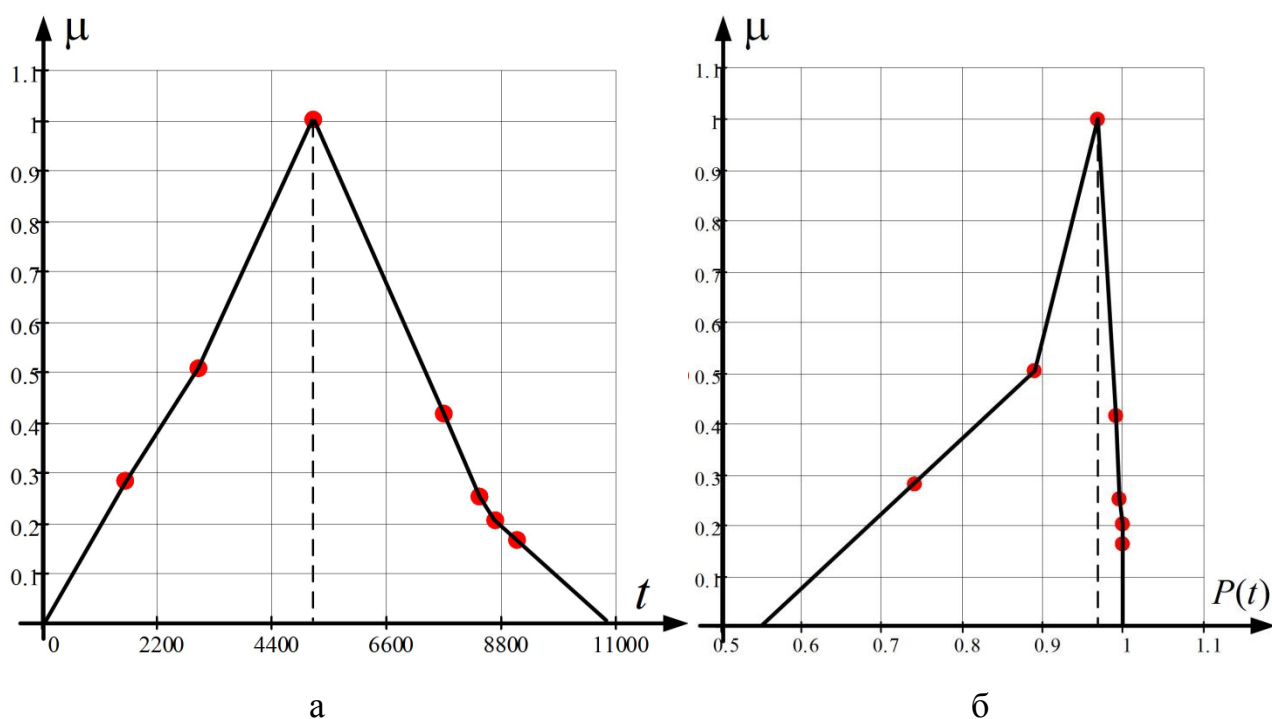


Рисунок 3.20 – Результаты сечений графика функции  $P(t)$  задвижки (а – нечеткое значение времени, б – нечеткое значение ВБР)

Результаты сечений могут быть подвергнуты дефазсификации методом центра тяжести для нахождения четких значений ВБР и времени [33].

Расчет функции ВБР для блока управления проводился для выборки, цензурированной справа, так как предполагается, что в пределах 45000 часов, все задвижки и электропривода отказали, а большая часть блоков управления находилась в исправном состоянии. Аналогичным образом были рассчитаны параметры распределений Kw-CWG и J-shaped описывающих данные об отказах БУ. Так как выборка цензурирована, при вычислении функций правдоподобия по методу ММП была использована формула (1.18) Значения параметров находятся в таблице Г.2. Следующим этапом стала оценка адекватности используемых моделей для анализа данных об отказах. Аналогичным образом были рассчитаны значения статистик для критериев согласия Пирсона, Колмогорова и Крамера-Мизеса-Смирнова по формулам для цензурированной выборки (1.19, 1.21, 1.24) соответственно. Результаты показали, что для уровня значимости  $\alpha=0.1$  гипотеза по критерию

Крамера-Мизеса-Смирнова отвергается в случае применения распределения Kw-CWG. В связи с этим, для оценки отказов блока управления была выбрана J-образная модель надежности. Результаты вычислений значений статистики также сведены в таблицу Г.2.

На рисунках 3.21, 3.22 приведены графики функции ВБР, описывающей данные об отказах блока управления.

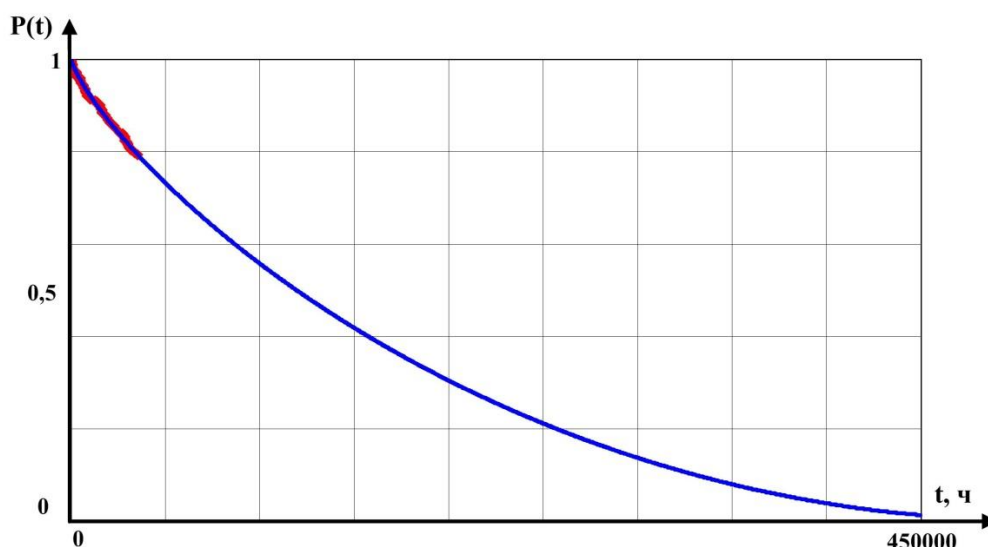


Рисунок 3.21 – График функции ВБР блока управления для J-образной МН

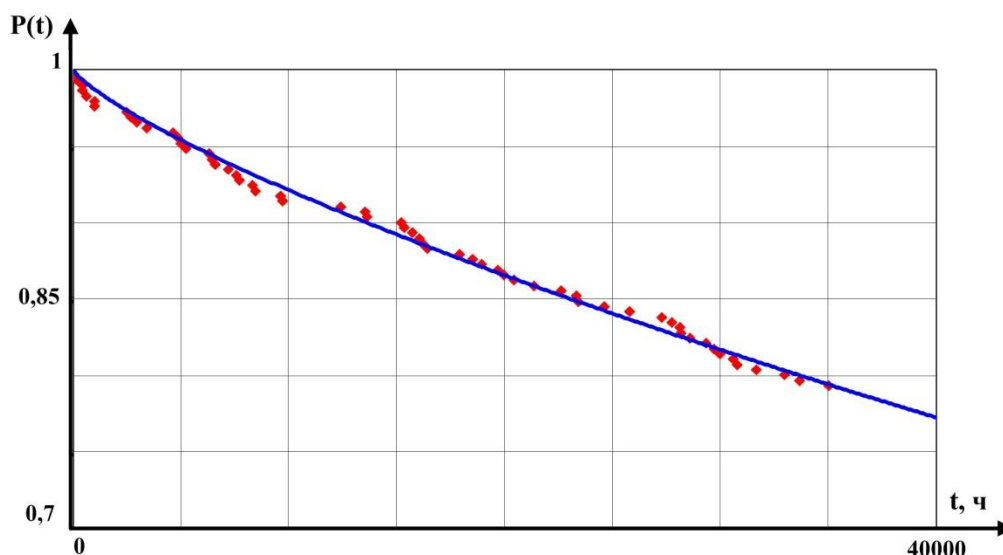


Рисунок 3.22 – График функции ВБР блока управления для J-образной МН (в масштабе)

Достаточно резкое уменьшение функции ВБР для блока управления на начальном участке характеризуется относительно высокой интенсивностью

отказов данного элемента в периоде приработки, в частности при пуско-наладочных работах. Это связано с распространенными ошибками при настройках этих компонентов.

### 3.4 Расчет показателей надежности для трубопроводов

В рамках работы был проведен анализ отказов участков трубопроводов аналогичных по своим характеристикам (диаметр, толщина стенки, протекающая среда, вид прокладки). Также немаловажным является то, что все отказы исследуемого объекта связаны с внутренней коррозией

Данные об отказах участков трубопроводов находятся в таблице А.3.

На первом этапе расчетов для выборки отказов из таблицы А.3 была проверена адекватность моделей надежности Kw-CWG и J-shaped, формулы функций ВБР для которых (1.9 и 1.12) соответственно.

Решая систему дифференциальных уравнений (1.15), полученную с помощью ММП, были вычислены точечные оценки значений параметров функций ВБР  $\hat{\Theta}_J$  и  $\hat{\Theta}_{KCWG}$ , которые находятся в таблице Г.2. Графики функций ВБР, описывающие данные об отказах трубопроводов, для анализируемых моделей надежности приведены на рисунках 3.23 и 3.24.

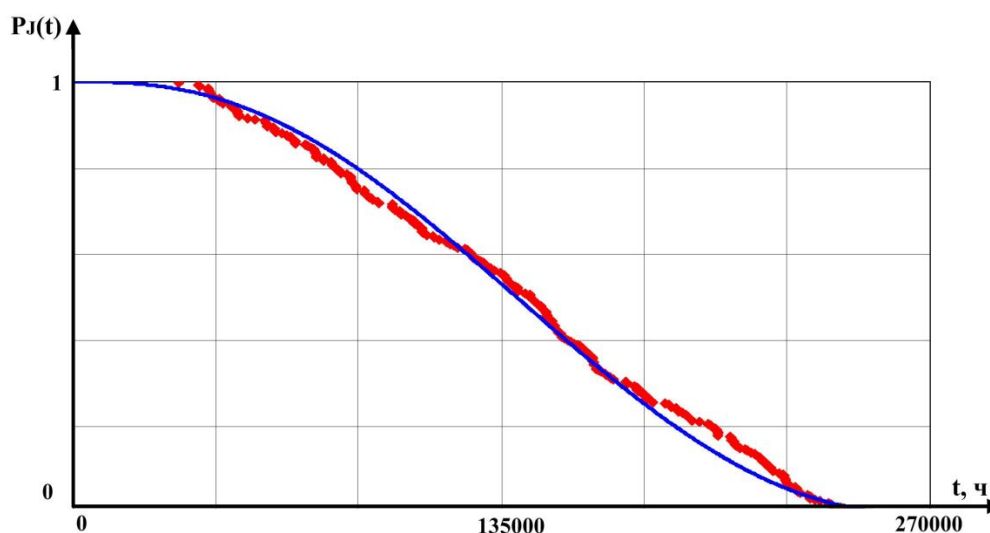


Рисунок 3.23 – График функции ВБР трубопроводов для J-образной МН

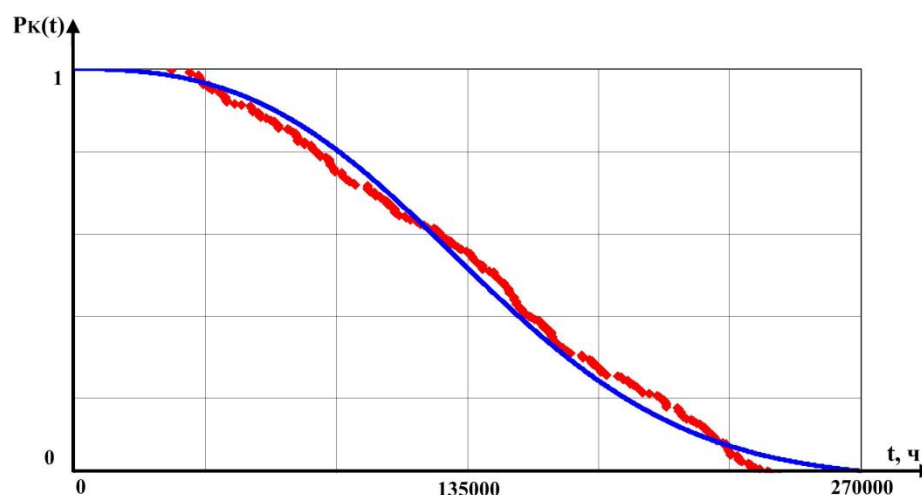


Рисунок 3.24 – График функции ВБР трубопроводов для комплементарной Вейбулл-геометрической МН Кумарасвами

В связи с подземной прокладкой анализируемых трубопроводов, внешние факторы не оказывают особого влияния на их надежность. Однако исследования материаловедов, а также специалистов органической и неорганической химии указывают на то, что температура, давление, состав и количество протекающей среды оказывают влияние на надежность трубопроводного транспорта. В частности на интенсивность образования коррозий [34]. Кроме того, перечисленные выше свойства сред постоянно меняются, что указывает на то, что трубопроводы эксплуатируются в условиях неопределенности.

В рамках данной работы, для того чтобы учесть постоянно меняющиеся условия протекающих сред, при расчете показателей надежности трубопроводов параметры модели надежности были заданы в виде нечетких чисел. Точечные оценки параметров J-образного распределения (таблица Г.2) были взяты в качестве ядер соответствующих нечетких параметров, а интервальные оценки с доверительной вероятностью  $(1 - \alpha)$  как  $\alpha$ -сечения нечетких параметров. При этом, в качестве носителя нечеткого множества было выбрано  $\alpha$ -сечение при наименьшем значении  $\alpha = 0,01$ . На рисунке 3.25 представлены нечеткие параметры J-образной модели надежности, заданные с помощью  $\alpha$ -сечений.

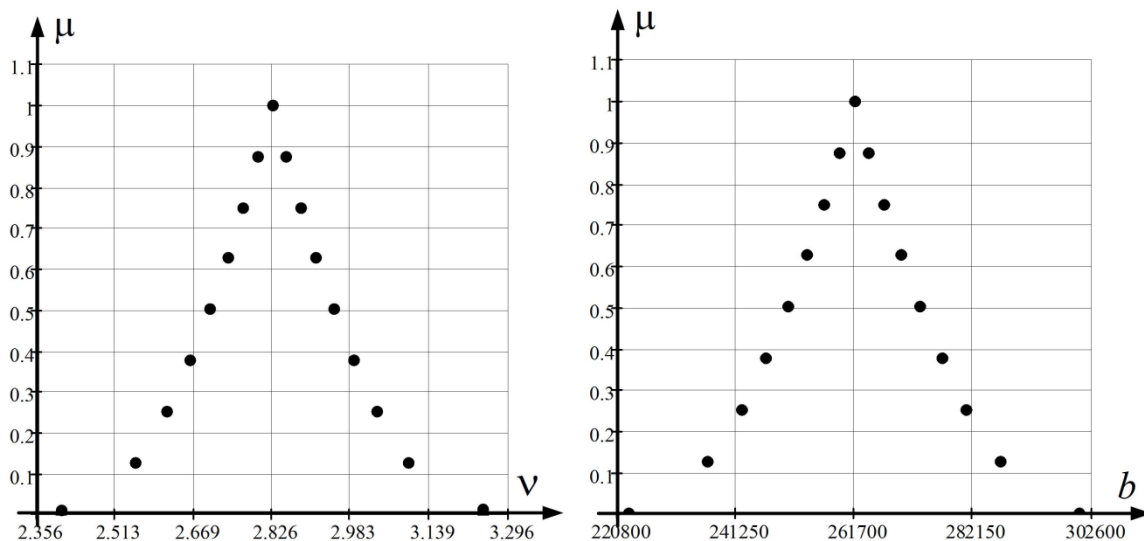


Рисунок 3.25 – Нечеткие значения параметров  $\nu$  и  $b$ .

Нечеткие значения параметров  $\tilde{\nu} = \langle 2.406, 2.846, 3.246 \rangle$ ,  $\tilde{b} = \langle 222800, 261700, 300600 \rangle$ . Используя выражения (2.3) - (2.5), для каждого момента времени  $i\Delta t, i = 0, 1, 2, \dots$  и каждого значения  $k\Delta\alpha, k = 0, 1, 2, \dots, \frac{1}{\Delta\alpha}$  были определены левые и правые границы  $\alpha$ -сечений нечеткой ВБР. Результатом является трехмерная поверхность в пространстве  $\{t, P, \mu\}$  (рисунки 3.26 и 3.27).

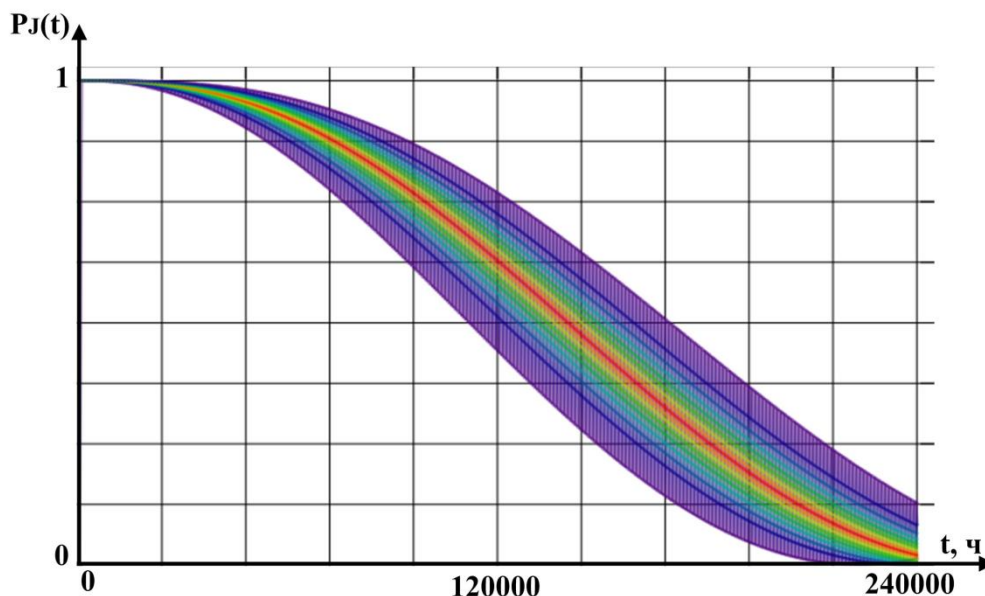


Рисунок 3.26 – График функции  $P(t)$  трубопроводов, принимающей нечеткие значения (вид сверху)

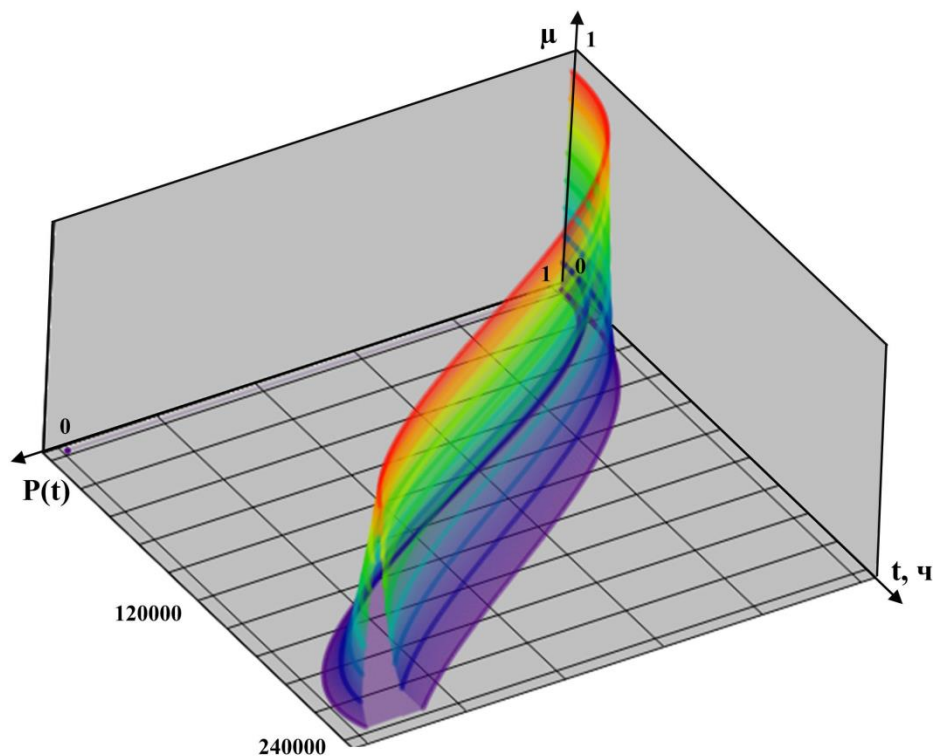


Рисунок 3.27 – График функции ВБР трубопроводов, принимающей нечеткие значения (изометрическая проекция)

Аналогичным способом, используя формулу (1.3), была получена функция интенсивностей отказов, принимающая нечеткие значения. Графики функции ИО изображены на рисунках 3.28 и 3.29.

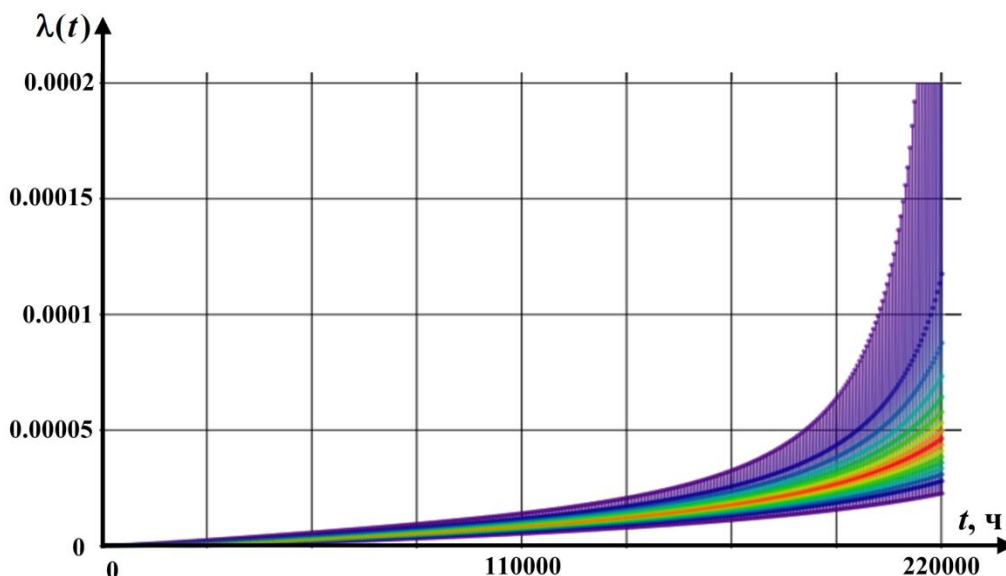
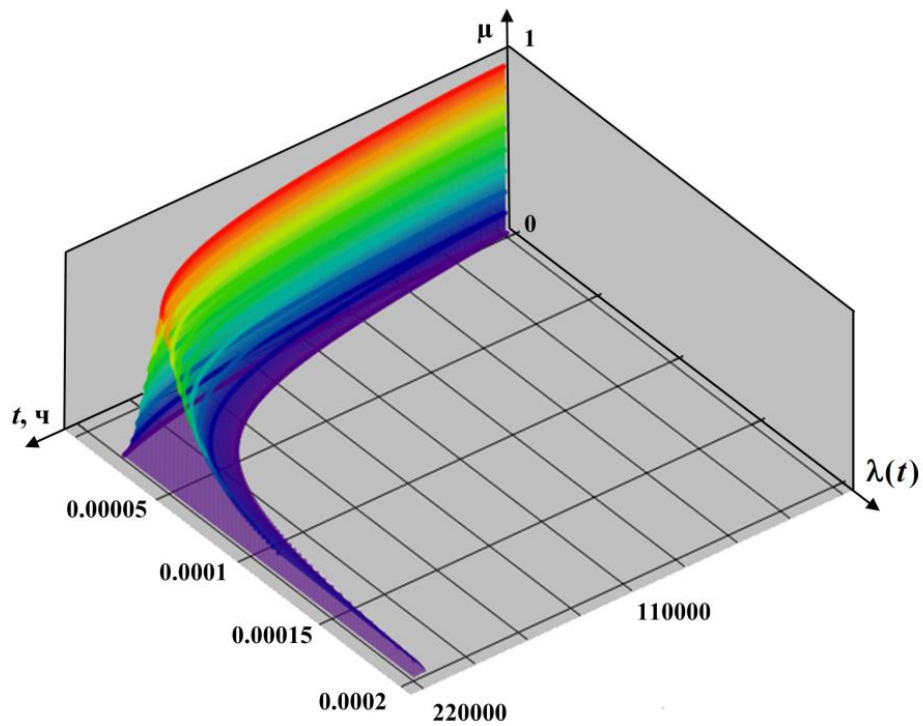


Рисунок 3.28 – График функции интенсивности отказов трубопроводов, принимающей нечеткие значения (вид сверху)



На рисунке 3.30 представлены нечеткие значения вероятности безотказной работы и времени, как результаты сечений функции  $P(t)$  плоскостью перпендикулярно оси ВБР и времени соответственно.

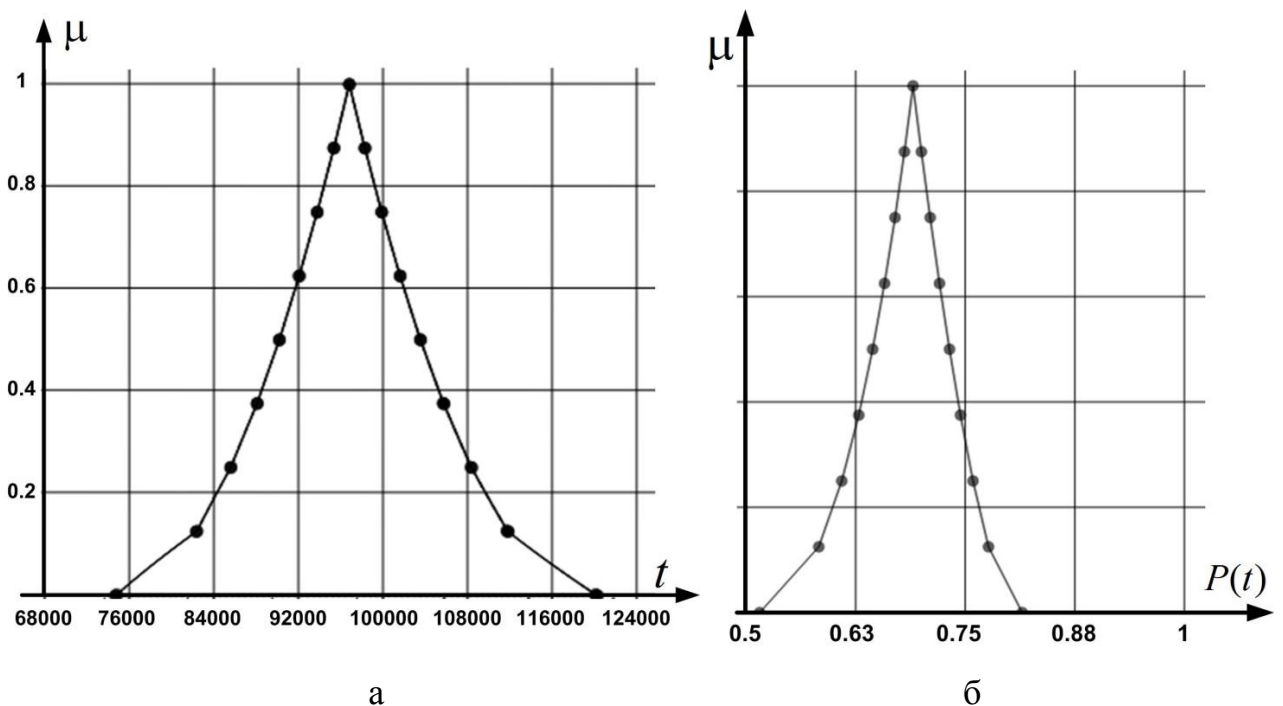


Рисунок 3.20 – Результаты сечений графика функции  $P(t)$  трубопроводов (а – нечеткое значение времени, б – нечеткое значение ВБР)

Результаты сечений могут быть подвергнуты дефаззификации методом центра тяжести для нахождения четких значений ВБР и времени [33].

### 3.5 Дальнейшее применение результатов исследований

В рамках данной главы были рассмотрены математические методы оценки надежности, которые базируются на основе закономерностей возникновения отказов. Показатели надежности, рассчитанные в данной работе, могут применяться совместно с физическими методами оценки надежности, основанными на изучении физико-химических процессов, с целью повышения отказоустойчивости оборудования и систем, применяемых в нефтегазовой промышленности.

Проработанные и достаточно информативные показатели эксплуатационной надежности являются основой при проведении RCM-анализа (Reliability Centered Maintenance) – методологии технического обслуживания, ориентированного на надежность [35]. Выявление причин возникновения отказов и определения их закономерностей, в том числе и в условиях неопределенности, позволяет оптимизировать процессы обслуживания по надежности. Другими словами, определить набор действий, которые должны быть выполнены для того, чтобы единица оборудования продолжала работать и выполнять свои основные функции. В частности, показатели надежности электропривода и запорной арматуры, принимающие нечеткие значения в зависимости от выработанного ресурса на отказ (в циклах), помогают связать ресурс и время наработки в одном показателе надежности и приблизительно оценить степень влияния ресурса на время возникновения отказа в процессе эксплуатации.

Имея достаточную информацию о влиянии характеристики среды на надежность участков трубопроводов, применение аппарата нечетких множеств в расчете показателей эксплуатационной надежности позволяет детально оценить степень этого влияния на отказоустойчивость, а также определить закономерности возникновения отказов, в зависимости от характеристики протекающей среды. Совместные исследования специалистов органической и неорганической химии, материаловедов и специалистов теории надежности позволят с высокой точностью прогнозировать отказы трубопроводов и



принимать дальнейшие решения по повышению надежности трубопроводного транспорта.

Также немаловажным направлением применений результатов исследований является технико-экономическое обоснование (ТЭО) при выборе трубопроводов и запорной арматуры с электроприводом. Сравнение детальных и информативных показателей эксплуатационной надежности различных марок однотипного оборудования, позволяет применять в будущем только самые надежные решения при выборе электрифицированных задвижек и трубопроводов.

Важно отметить, что подходы к получению показателей надежности, принимающие нечеткие значения, рассмотренные в ходе настоящего исследования, могут быть применены в расчете и оценке надежности практически любого оборудования, функционирующего в различных режимах работы и условиях неопределенности.

## **4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

На сегодняшний день перспективность научного исследования определяется коммерческой ценностью разработки и масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

### **4.1 Планирование научно-исследовательских работ**

#### **4.1.1 Структура работ в рамках научного исследования**

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- 1) определение структуры работ в рамках научного исследования;
- 2) определение участников каждой работы;
- 3) установление продолжительности работ;

4) построение графика проведения научных исследований.

В данном разделе был составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проведено распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблиц.4.1.

Таблица 4.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

<b>Основные этапы</b>	<b>№ раб</b>	<b>Содержание работ</b>	<b>Должность исполнителя</b>
Постановка целей и задач, получение исходных данных	1	Составление и утверждение технического задания	НР,И
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	НР,И
	3	Проведение патентных исследований	НР,И
	4	Разработка календарного плана	НР,И
Анализ моделей надёжности	5	Обсуждение литературы	НР,И
	6(1)	Выбор адекватных моделей надёжности для проведения исследований	НР,И
	6(2)	Аппроксимация реальных данных об отказах	НР,И
	6(3)	Получение нечетких показателей надёжности	И
<i>Проведение ОКР</i>			
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	7	Оформление расчетно-пояснительной записки	И
	8	Оформление графического материала	И
	9	Подведение итогов	НР,И

#### 4.1.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула: [36]

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Для выполнения перечисленных в таблице 4 работ требуются специалисты: инженер (И); научный руководитель (НР).

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %. [37]

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

#### 4.1.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:[36]

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:[36]

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.5)$$

где  $T_{\text{КАЛ}}$  – календарные дни ( $T_{\text{КАЛ}} = 366$ );

$T_{\text{ВД}}$  – выходные дни ( $T_{\text{ВД}} = 52$ );

$T_{\text{ПД}}$  – праздничные дни ( $T_{\text{ПД}} = 12$ ).

$$T_{\text{К}} = \frac{366}{366 - 52 - 12} = 1,212$$

В таблице 4.2 приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе.

Таблица 4.2 – График проведения научного исследования

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни									Длительность работ, чел/дн.											
											$T_{Pi}$						$T_K$					
		$t_{min}$			$t_{max}$			$t_{ож}$			НР			И			НР			И		
Постановка задачи	НР	3			5			3,8			4,56			–			5,53			–		
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2			4			2,8			0,34			3,36			0,41			4,07		
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	10			13			11,2			4,03			13,44			4,88			16,28		
Разработка плана	НР, И	2			4			2,8			0,67			3,36			0,81			4,07		
Обсуждение литературы	НР, И	2			4			2,8			1,01			3,36			1,22			4,07		
Анализ МН	НР, И	15	12	6	20	15	10	17	13,2	7,6	14,8	7,92	-	20,4	15,84	9,12	17,3	9,6	-	24,72	19,19	11,05
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	6			9			7,2			-			8,64			-			10,47		
Оформление графического материала	И	2			5			3,2			-			3,84			-			4,65		
Подведение итогов	НР, И	2			3			2,4			1,72			2,88			2,08			3,49		
<b>Итого:</b>		44	44	33	55	55	44	53,	49,	43,	23,	13,	6	78,1	59,2	52,5	32,2	24,	14,	71,	66,	58,
		4	1	5	7	2	7	2	4	8	1	22		2	8	6	3	5	93	82	29	15

Затраты времени на все виды исполнений, приблизительно одинаковы. Отличаются только на 6 этапе (Анализ МН).

На основе таблицы 4.2 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблице 4.3 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Легенда к таблице:

 Научный руководитель (НР),

 Инженер.

Таблица 4.5 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т <sub>кi</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ										
				март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Постановка задачи	НР	6	■										
2	Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	4		■									
3	Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	16		■	■	■							
4	Разработка календарного плана	НР, И	4				■							
5	Обсуждение литературы	НР, И	4				■							
6	Анализ МН	НР, И	25				■	■	■					
7	Оформление расчетно-пояснительной записки	И	10							■	■	■		
8	Оформление графического материала	И	5									■	■	
9	Подведение итогов	НР, И	4										■	■



## 4.2 Расчет сметы затрат на создание макета КУ

В состав затрат на создание проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости на выполнение данной разработки производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- основная заработная плата;
- отчисления в социальные фонды;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- работы, выполняемые сторонними организациями;
- прочие расходы.

### 4.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам и приведена в таблице 8.

Таблица 4.6 – Расходные материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	230	1 уп.	230
Ручка шариковая	15	2 шт.	30
Карандаш	15	1 шт.	15
Оплетка для расчетно-пояснительной записки	60	1 шт.	60
<b>Итого:</b>			<b>335</b>

Пусть ТЗР составляет 5% от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны

$$C_{\text{мат}} = 335 \cdot 1,05 = 352 \text{ рубль.}$$

#### 4.2.2 Расчет основной заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/24,83 \quad (4.6)$$

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 4.7. При расчете учитывалось, что в году 298 рабочих дней и, следовательно, в месяце 24,83 рабочих дня. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 4.4. Также был принят во внимание учитывающий коэффициент дополнительной заработной платы  $K_{\text{ДЗ}}$  = 1,1;  $K_{\text{доп.ЗП}}$  = 1,188;  $K_{\text{р}}$  = 1,3. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_{\text{и}}$  = 1,1\* 1,188\*1,3 = 1,699.

Таблица 4.7 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	23 264,86	936,97	24	1,699	38205,33
И	7 915	318,77	73	1,699	39536,09
<b>Итого:</b>					<b>92068,63</b>

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили

$$C_{\text{осн}} = 53863,3 \text{ руб.}$$

#### 4.2.3 Расчет отчислений от заработной платы

Затраты по этой статье составляют отчисления по единому социальному налогу (ЕСН).

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{\text{соц}} = K_{\text{соц}} \cdot C_{\text{осн}}, \quad (4.7)$$

где  $K_{\text{соц}}$  – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 30% от затрат на заработную плату и включает в себя:

- 1) отчисления в пенсионный фонд;
- 2) на социальное страхование;
- 3) на медицинское страхование.

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{\text{соц}} = 0,3 * 53863,3 = 16158,99 \text{ руб.}$$

#### 4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}} \quad (4.8)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;  $Ц_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;  $t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $Ц_{\text{э}} = 5,257 \text{ руб./кВт·час}$  (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 4 для инженера ( $T_{\text{рд}}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} * K_t,$$

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{НОМ}} \cdot K_C, \quad (4.9)$$

где  $P_{\text{НОМ}}$  – установленная мощность оборудования, кВт;  $K_C$  – коэффициент спроса, зависящий от количества, загрузки групп электроприемников. Для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ .

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Затраты на электроэнергию для технологических целей

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $\text{Э}_{\text{ОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	368	0,3	580
Струйный принтер	1	0,1	0,53
<b>Итого:</b>			<b>580,53</b>

#### 4.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» от используемого оборудования рассчитывается амортизация за время выполнения работы для оборудования, которое имеется в наличии [37].

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{N_A \cdot C_{\text{ОБ}}}{F_D} \cdot t_{\text{рф}} \cdot n, \quad (4.10)$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации,  $N_A = 25\%$ ;  $C_{\text{ОБ}}$  – цена оборудования,  $C_{\text{ОБ}} = 56000$  руб.;  $F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени,  $F_D = 2384$  часа;  $t_{\text{рф}}$  – фактическое время работы оборудования при создании программного продукта,  $t_{\text{рф}} = 368$  часа;  $n$  – число задействованных ПЭВМ,  $n = 1$ .

Итак, затраты на амортизационные отчисления составили:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{0,25 \cdot 56000 \cdot 1 \cdot 368}{2384} = 2161,07 \text{ руб.}$$

Для принтера  $C_{\text{об}} = 12000$  руб., его  $F_{\text{д}} = 500$  час.,  $N_{\text{а}} = 50\%$ , тогда его амортизация составит:

$$C_{\text{ам}} = \frac{0,5 \cdot 12000 \cdot 1}{500} = 36 \text{ руб.}$$

Итого  $C_{\text{ам}} = 2161,07 \text{ руб} + 36 \text{ руб.} = 2197,07 \text{ руб.}$

#### 4.2.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на разработку проекта, которые не учтены в предыдущих статьях. Их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}) \cdot 0,1. \quad (4.11)$$

Подставим значения и вычислим:

$$C_{\text{проч.}} = (335 + 92068,63 + 16158,99 + 580,53 + 2197,07) \cdot 0,1 = 11130,4 \text{ руб.}$$

#### 4.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет сметы затрат на разработку, можно определить общую стоимость разработки проекта.

Таблица 4.9 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	335
Основная заработная плата	$C_{\text{осн}}$	92068,63
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	16158,99
Расходы на электроэнергию	$\text{Э}$	580,53
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	2197,07
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нр}}$	–
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	11130,4
<b>Итого:</b>		<b>122407,62</b>

Таким образом, расходы на разработку составили  $C = 122407,62$  руб.

#### 4.2.8 Прибыль

Примем прибыль в размере 5 - 20 % от полной себестоимости проекта. В нашем случае она составляет 24494,12 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

#### **4.2.9 НДС**

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$(122407,62 + 24494,12) * 0,18 = 26442,31 \text{ руб.}$$

#### **4.2.10 Цена разработки НИР**

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 80408,9 + 16081,04 + 17368,32 = 113858,26 \text{ руб.}$$

### **4.3 Оценка экономической эффективности проекта**

В рамках работы не представляется возможным оценить экономическую эффективность проекта, потому что для этого необходимо проводить полноценное исследование.

Но исходя из специфики исследований, которые направлены на повышение надежности оборудования в рамках «НК «Роснефть», можно предположить некоторые косвенные эффекты от внедрения:

1. Сокращение затрат на ремонт и обслуживание оборудования на 10%;
2. сокращение числа внеплановых простоев на 12%;
3. снижение затрат на устранение последствий отказов оборудования на 15%.

К тому же, учитывая факт детального анализа надежности большой части основных фондов производственных активов, можно предположить положительный экономический эффект, в связи с закупом лучшего оборудования по показателям – цена, надежность, качество.

#### **4.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР**

Научно-технический уровень характеризует, в какой мере выполнены работы и обеспечивается научно-технический прогресс в данной области. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод бальных оценок. Бальная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале

присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям или рассчитывают по формуле. На этой основе делается вывод о целесообразности НИР [38].

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент ее научно-технического уровня по формуле:

$$K_{НТУ} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i, \quad (4.12)$$

где  $K_{НТУ}$  – коэффициент научно-технического уровня;  
 $R_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го признака научно-технического эффекта;  $n_i$  – количественная оценка  $i$ -го признака научно-технического эффекта, в баллах.

Таблица 4.10 – Весовые коэффициенты признаков НТУ

<b>Признак научно-технического эффекта НИР</b>	<b>Характеристика признака НИОКР</b>	<b><math>R_i</math></b>
Уровень новизны	Систематизируются и обобщаются сведения, определяются пути дальнейших исследований	0,6
Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	0,1
Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0,3

Таблица 4.11 – Баллы для оценки уровня новизны

<b>Уровень новизны</b>	<b>Характеристика уровня новизны</b>	<b>Баллы</b>
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8 – 10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5 – 7

Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2 – 4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 4.12 – Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
Установка закона, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ, взаимодействия между факторами с наличием объяснений	10
Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	4
Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 4.13 – Возможность реализации научных, теоретических результатов по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Результаты оценок признаков научно-технического уровня приведены в таблице 4.13. Баллы по параметрам времени и масштабам реализации при расчете складываются. Исходя из оценки признаков НИОКР, показатель научно-технического уровня для данного проекта составил:

$$K_{\text{нту}} = 0,4*4 + 0,1*6 + 0,5*10 = 1,6 + 0,6 + 5 = 7,2$$

Таким образом, исходя из данных в таблице 17, проект имеет высокий уровень научно-технического эффекта.



Таблица 4.14 – Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень НТЭ	Показатель НТЭ
Низкий	1-4
Средний	4-7
Высокий	7-10

Обоснование оценки признаков НИОКР приводится в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Сводная таблица оценки научно-технического уровня НИР

Фактор НТУ	Значимость	Уровень фактора	Балл	Обоснование выбранного балла
Уровень новизны	0,4	Относительно новая	4	Данный метод объединяет опыт предыдущих разработок в этом направлении, учитывает их недостатки и представляет более выгодный подход к эксплуатационной оценке надежности
Теоретический уровень	0,1	Разработка способа (алгоритма)	6	Следуя изложенному в методе алгоритму возможно вычислить нечеткие показатели эксплуатационной надежности для оборудования, работающего в различных условиях эксплуатации.
Возможность реализации	0,5	В течение первых лет	10	Возможность реализации в кратчайшие сроки

## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### 5.1 Введение

Настоящая квалификационная работа является необходимым этапом реализации проекта, предусматривающего исследование в области получения нечетких показателей надежности для оборудования нефтегазового промысла. Процесс получения показателей надежности заключается в анализе статистических данных по отказам оборудования и построении моделей надежности, в связи с этим, основным методом расчета, применимым в рамках данной работы является компьютерное моделирование. Таким образом, основными рабочими средствами, задействованными в данной работе, являются ПК.

### 5.2 Производственная безопасность

Работа в области получения нечетких показателей надежности для оборудования нефтегазового промысла относится к категории работ связанных с опасными и вредными производственными факторами.

Таблица 5.1 – Опасные и вредные факторы при расчете эксплуатационной надежности

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа за персональным компьютером	1. Повышенный уровень шума; 2. Несоответствующий микроклимат рабочего помещения; 3. Повышенный уровень электромагнитных излучений; 4. Недостаточная освещенность рабочего помещения;	1. Электрический ток	1. СанПиН 2.2.4-548-96 [39] 2. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [41]; 3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.127 8-03 [40].

Далее более подробно рассмотрим данные опасные и вредные факторы.

Вредные производственные факторы – факторы, воздействие которых на человека могут привести к его заболеванию и снижению работоспособности.

Опасные производственные факторы – факторы, воздействие которых могут привести к травме, отравлению, внезапному резкому ухудшению здоровья, или смерти человека.

### 5.2.1 Отклонение параметров микроклимата

Требования к параметрам микроклимата определяются согласно СанПиН 2.2.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»[39].

Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения (значительные или незначительные тепловыделения). Допустимые параметры микроклимата, приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Микроклимат производственных помещений

Период года	Температура воздуха, °С	Скорость движения воздуха, м/с	Относительная влажность воздуха, %
Холодный	22-24	до 0,1	40-60
Теплый	23-25	0,1-0,2	40-60

В рабочем помещении поддержание параметров микроклимата должно обеспечиваться отоплением и кондиционированием, температура воздуха в помещении соответствует норме. В таких условиях человек способен полноценно работать, отдыхать и проводить свободное время.

### 5.2.2 Недостаточность освещения

Согласно СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» и СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий» [40]:

- Минимальное естественное освещение должно быть  $E_n = 1,2$  К.Е.О.
- Минимальная освещенность при использовании ПЭВМ составляет  $E_t = 300$  лк.

– Освещенность рабочего стола должна быть не менее 300 лк, что может достигаться установкой местного освещения.

– Местное освещение не должно создавать бликов на экране. Следует ограничивать отраженную блесккость на рабочих поверхностях (экран, стол, клавиатура) за счет правильного выбора и расположения светильников, яркость бликов на экране не должна превышать 40 кд/м<sup>2</sup>.

– Светильники местного освещения должны иметь не просвечивающий отражатель.

### **5.2.3 Повышенный уровень шума**

Шумы – это беспорядочные звуковые колебания разной физической природы, характеризующиеся случайным изменением амплитуды, частоты и др.

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума – это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Допустимый уровень шума – это уровень, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов, чувствительных к шуму.

Шум, возникающий при работе оборудования и превышающий нормативные значения, негативно воздействует на центральную и вегетативную нервную систему человека, органы слуха.

На рабочем месте шум создается следующими источниками: охлаждающей системой ПЭВМ, печатающим механизмом принтера, системой кондиционирования помещения.

В таблице 3 согласно [38] указаны предельные уровни звука в зависимости от категории тяжести и напряженности труда, являющиеся безопасными в отношении сохранения здоровья и работоспособности.

Таблица 5.3 – Предельные уровни звука, дБ, на рабочих местах

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентного звука (в дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Научная деятельность, проектирование	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены ПЭВМ, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами.

#### 5.2.4 Повышенные уровни электромагнитного поля

ПК при работе излучают электромагнитные радиочастоты, значит, работники подвержены воздействию электромагнитных полей.

Силовые линии электромагнитных полей не ограничиваются экраном монитора, а охватывают всё пространство вокруг, значит, персонал целесообразно размещать вдоль стен, так чтобы панель монитора была обращена к стене[41].

Предельно допустимые значения излучений от ЭВМ в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [41] приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Параметры неионизирующих электромагнитных излучений

Наименование параметров	Допустимое значение
Напряжённость электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг ВДТ по электрической составляющей должна быть не более: в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц; в диапазоне частот 2 – 400 кГц.	25 В/м 2,5 В/м
Плотность магнитного потока должна быть не более: в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц; в диапазоне частот 2 – 400 кГц.	250 нТл 25 нТл
Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать:	500 В

Возможные способы защиты от ЭМП:

Увеличение расстояния от источника: для избегания последствий экран видеомонитора должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя;

Для снижения воздействия электромагнитного излучения следует применять мониторы с пониженным уровнем излучения, придерживаться регламентированного режима труда и отдыха, а также проводить регулярную гигиеническую уборку помещения.

### 5.2.5 Электрический ток

Электрические установки представляют для человека большую потенциальную опасность, которая усугубляется тем, что органы чувств человека не могут на расстоянии обнаружить наличие электрического напряжения на оборудовании.

Рассмотрим основные причины поражения человека электрическим током на рабочем месте:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;

- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ПЭВМ);
- при соприкосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- В помещении используются приборы, потребляющие напряжение 220В переменного тока с частотой 50Гц. Это напряжение опасно для жизни, поэтому обязательны следующие меры предосторожности:
  - перед началом работы нужно убедиться, что выключатели и розетка закреплены и не имеют оголённых токоведущих частей;
  - при обнаружении неисправности оборудования и приборов необходимо не делая никаких самостоятельных исправлений сообщить ответственному за оборудованием;
  - запрещается загромождать рабочее место лишними предметами;
  - при возникновении несчастного случая следует немедленно освободить пострадавшего от действия электрического тока и оказать ему необходимую помощь, предварительно вызвав врача.

### **5.2.6 Экологическая безопасность**

Работа с ПК не влечет за собой негативных воздействий на окружающую среду, поэтому создание санитарно-защитной зоны и принятие мер по защите атмосферы, гидросферы, литосферы не являются необходимыми.

Исключением являются лишь случаи утилизации персонального компьютера, как твердого отхода и как следствие загрязнение почвы или выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, углекислого газа, образование тепла в случае пожара.

При завершении срока службы ПК, их можно отнести к отходам электронной промышленности. Пластмассовые части ПК утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. Части компьютера, печатные платы, содержащие тяжелые металлы и замедлители горения могут при горении выделять опасные диоксиды. Поэтому для опасных отходов

существуют специальные печи, позволяющие использовать теплоту сжигания. Но подобный способ утилизации является дорогостоящим, поэтому не стоит исключать вероятность образования токсичных выбросов.

Отходы, не подлежащие переработке и вторичному использованию подлежат захоронению на полигонах.

### **5.2.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдать следующие правила пожарной безопасности:

применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов.

эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;

технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей которые могут
- привести к короткому замыканию или пробое изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

Пожарная профилактика представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращении пожара, ограничение его распространения, а также создание условий для успешного тушения пожара. Для профилактики пожара



чрезвычайно важна правильная оценка пожароопасности здания, определение опасных факторов и обоснование способов и средств пожар предупреждения и защиты.

Одно из условий обеспечения пожаробезопасности - ликвидация возможных источников воспламенения.

В целях предотвращения пожара предлагается проводить с инженерами, работающими в лаборатории, противопожарный инструктаж.

В лаборатории источниками воспламенения могут быть неисправное электрооборудование, неисправности в электропроводке, электрических розетках и выключателях.

Для исключения возникновения пожара по этим причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неисправности, проводить плановый осмотр и своевременно устранять все неисправности и неисправные электроприборы и не использовать неисправные электроприборы.

Обогревание помещения открытыми электронагревательными приборами могут привести к пожару, т.к. в помещении находятся бумажные документы и справочная литература. Следовательно, использование открытого нагревательного прибора неприемлемо.

В целях уменьшения вероятности возникновения пожара вследствие короткого замыкания необходимо, чтобы электропроводка была скрытой.

В летний период во время грозы возможно попадание молнии вследствие чего возможен пожар. Во избежание этого рекомендуется установить на крыше здания молниеотвод.

Несоблюдение мер пожарной безопасности и курение в помещении также может привести к пожару. Поэтому курение в помещении лаборатории необходимо категорически запретить.

В случае возникновения пожара необходимо отключить электропитание, вызвать по телефону пожарную команду, эвакуировать людей из помещения согласно плану эвакуации и приступить к ликвидации пожара огнетушителями.

При наличии небольшого очага пламени можно воспользоваться подручными средствами с целью прекращения доступа воздуха к объекту возгорания.

### **5.2.8 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Рабочее место должно отвечать требованиям техники безопасности.

Рабочее место - это часть пространства, в котором инженер осуществляет трудовую деятельность, и проводит большую часть рабочего времени. Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности работника, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера обеспечивает ему удобное положение при работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы. В частности, при организации рабочего места должны быть соблюдены следующие основные условия: [42]

- оптимальное размещение оборудования, входящего в состав рабочего места;
- достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения;
- необходимо естественное и искусственное освещение для выполнения поставленных задач;
- уровень акустического шума не должен превышать допустимого значения.

Главными элементами рабочего места являются письменный стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя. Поэтому для исключения возникновения заболеваний, связанных с малой подвижностью работника, необходимо иметь возможность свободной перемены поз. Также

необходимо соблюдать режим труда и отдыха с перерывами, заполняемыми “отвлекающими” мышечными нагрузками на те звенья опорно-двигательного аппарата, которые не включены в поддержание основной рабочей позы.

По условиям работы рабочее место относится к индивидуальному рабочему месту для работы сидя. Рабочее место должно занимать площадь не менее 6 м, высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м<sup>3</sup> на одного человека.

Рабочий стул должен быть снабжен подъемно-поворотным механизмом. Высота сиденья должна регулироваться в пределах (400 - 500) мм. Глубина сиденья должна составлять не менее 380 мм, а ширина - не менее 400 мм. Высота опорной поверхности спинки не менее 300 мм, ширина - не менее 380 мм. Угол наклона спинки стула к плоскости сиденья должен изменяться в пределах (90 – 110)°.

При исследовании метода никаких специальных требований трудового законодательства не предусмотрено.

В организации должна быть сформирована комиссия по чрезвычайным ситуациям (КЧС). В ряде случаев при отсутствии КЧС предусмотрено возложение координирующих функций на руководителя организации.

Основными задачами объектовой КЧС являются:

- руководство разработкой и осуществлением мероприятий по предупреждению ЧС, повышению надежности работы объекта, обеспечению устойчивости его функционирования при возникновении ЧС;
- организация работ по созданию на потенциально опасном объекте локальной системы оповещения, поддержание ее в постоянной готовности;
- обеспечение готовности органов управления, сил и средств к действиям при чрезвычайных ситуациях, руководство их ликвидацией и эвакуацией персонала объекта;
- руководство созданием и использованием резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций;
- организация подготовки руководящего состава.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы был проведён расчет эксплуатационных показателей надежности, принимающих нечеткие значения, для задвижки с электрическим приводом и блоком управления, а также для участков трубопроводов.

В ходе проведения расчетов показателей надежности, для описания данных об отказах исследуемых объектов были применены комплементарная Вейбулл-геометрическая модель надежности Кумарасвами и J-образная модель надежности. Адекватность применения указанных моделей для анализа данных оценивалась по критериям согласия Пирсона, Колмогорова и Крамера-Мизеса-Смирнова. Выбор наиболее подходящей модели для оценки отказов основывался на информационном критерии Акаике, состоятельном информационном критерии Акаике, Байесовском информационном критерии и на информационном критерии Ханнана-Куина.

По результатам проведенного анализа было отмечено, что модель надежности Kw-CWG лучше подходит для описания отказов электрического привода и задвижки, а свою очередь J-образная МН для описания отказов трубопроводов и блока управления.

В ходе исследования были получены показатели надежности, принимающие нечеткие значения, для электропривода и задвижки, где нечеткость связана с выработанным ресурсом (в циклах) на отказ этих устройств. Для трубопроводов были также рассчитаны эксплуатационные показатели надежности, при этом параметры модели надежности были заданы в виде нечетких чисел, а расчет надежности проводился в общем виде, в связи с отсутствием информации, явно указывающей влияние тех или иных свойств протекающей среды на отказоустойчивость исследуемых участков трубопроводов. Основываясь на опыте эксплуатации блоков управления, было установлено, что изменяющиеся условия внешней среды и режимы работы не оказывают особого влияния на отказоустойчивость этого объекта. В связи с

чем, были рассчитаны классические эксплуатационные показатели надежности для БУ.

Результаты исследований в дальнейшем могут быть применены при RCM-анализе, с целью оптимизации технического обслуживания и регламентных работ. Также достаточно информативные показатели эксплуатационной надежности являются хорошей основой для технико-экономического обоснования при выборе оборудования.

Подходы к получению показателей надежности, принимающие нечеткие значения, рассмотренные в ходе настоящего исследования, могут быть применены в расчете и оценке надежности практически любого оборудования, функционирующего в различных режимах работы и условиях неопределенности.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Кармачев Д.П., Ефремов А.А. Анализ моделей надёжности технических систем с U-образной функцией интенсивности отказов // «Современная техника и технологии»: Сборник докладов XX международной практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2014. –Том 2, С. 185-186.

2. Кармачев Д.П. Построение нечеткой функции интенсивности отказов средствами пакета прикладных программ Mathcad // «Молодежь и современные информационные технологии»: Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2014. – С. 124-125.

3. Кармачев Д.П. Дефаззификация нечеткой функции вероятности безотказной работы на примере J-образной модели надежности // «Технологии Microsoft в теории и практике программирования»: Сборник трудов XII всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томский политехнический университет. – Томск, 2015. – С. 81-82.

4. Кармачев Д.П. Использование аппарата нечетких множеств для расчета надежности // «Молодежь и современные информационные технологии»: Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2016. – С. 162-163.

5. Кармачев Д.П. Применение аппарата нечетких множеств в расчете надежности оборудования нефтегазового промысла // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине. – Томск, 23-26 мая 2016 (не издано).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В.А. Острейковский. Теория надежности: учебник для вузов – М.: Высшая школа, 2003 – 463 с.
2. А.И. Владимирова, В.Я. Кершенбаума. Промышленная безопасность и надежность магистральных трубопроводов: учебник для вузов – М.: Национальный институт нефти и газа, 2009. – 696 с.
3. Л.А. Заде. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений. – М.: Мир, 1976 – 165 с.
4. А.М. Половко. Основы теории надёжности: учебное пособие / С.В. Гуров – СПб.: БХВ-Петербург, 2006 – 704 с.
5. И.А. Ушаков. Курс теории надёжности систем: учебное пособие – М.: Дрофа, 2008 – 239 с.
6. В.М. Труханов. Надёжность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов: учебник для вузов – М.: Машиностроение, 2003 – 320 с.
7. В.Б. Гнеденко. Математически методы в теории надёжности: учебное пособие / Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьёв. – М.: Наука, 1965 – 524 с.
8. S. Nadarajah. Moments of some J-shaped distributions / S. Kotz. // Journal of Applied Statistics. – 2003. – Vol.30, №3. – P.311-317.
9. Ahmed Z. Afify. A New Lifetime Model with Variable Shapes for the Hazard Rate / Gauss M. Cordeiro, Nadeem Shafique Butt, Edwin M. M. Ortega, Adriano K. Suzuki [Электронный ресурс] // Brazilian Journal of Probability and Statistics. – 2016 (unpublished). – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/303299501\\_A\\_New\\_Lifetime\\_Model\\_with\\_Variable\\_Shapes\\_for\\_the\\_Hazard\\_Rate](https://www.researchgate.net/publication/303299501_A_New_Lifetime_Model_with_Variable_Shapes_for_the_Hazard_Rate), free (date: 18.05.2016).
10. Ю.В. Прохорова. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия – М.: Большая Российская Энциклопедия, 2003 – 457 с.
11. Б.И. Сухорученков. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы – М.: Вузовская книга, 2010 – 384 с.
12. А.И. Кобзарь. Прикладная математическая статистика – М.: Физмалит, 2006 – 816 с.
13. Sibjers Jan. Maximum Likelihood estimation of signal amplitude and noise variance from MR data / den Dekker A.J. // Magnetic Resonance in Medicine. – 2003. – Vol.51, №3. – P.584-594.
14. Б.Ю. Лемешко. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах / С.Б. Лемешко, С.Н. Постовалов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2008. – Том XI, № 2(34).

15. A. N. Kolmogoroff. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione // *Giornale Ist. Ital. degli Attuari.* – 1933. – Vol. 4, №1. – P. 83-91.
16. Н.С. Галанова, Б.Ю. Лемешко, Е.В. Чимитова. Применение непараметрических критериев согласия к проверке адекватности моделей ускоренных испытаний // *Автометрия.* – 2012. – Том 48, №6. – С. 53-68.
17. Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. Таблицы математической статистики – М.: Наука, 1983 – 524 с.
18. Л.Н. Большев. Асимптотические пирсоновские преобразования // *Теория вероятностей и ее применение.* – 1963. – Том 8, №2. – С. 129-155.
19. А.В. Антонов, М.С. Никулин. Статистические модели в теории надежности: Учебное пособие – М.: Абрис, 2012 – 390 с.
20. Greene William H. *Econometric Analysis*, 7th edition - NY.: Pearson, 2002 – 1240 p.
21. Ефремов А.А., Кориков А.М. О применении кусочно-непрерывных функций к заданию функций принадлежности нечетких чисел (L-R)-типа [Электронный ресурс] // *Вестник науки Сибири.* – 2011. - №. 1(1). - Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/70/117>, свободный (дата обращения: 10.03.2016).
22. Ефремов А.А. Новые операции над нечеткими числами и интервалами // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.* – 2013. - №. 1(27). – С. 95-99.
23. Buckley J.J. *Simulating Fuzzy Systems.* – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005. – 208 p.
24. Т.В. Азарнова. Методы оптимизации: учебное пособие / И.Л. Каширина, Г.Д. Чернышова. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. – 87 с.
25. Ефремов А.А. Вычисление нечеткой вероятности безотказной работы систем с нечеткими параметрами моделей надежности // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.* – 2015. - №. 2(36). – С. 136-140.
26. Zhang H. *Fuzzy Modeling and Fuzzy Control* / H. Zhang, D. Liu. – Boston: Birkhäuser, 2006. – 416 p.
27. *Life Data Analysis Reference Book* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://reliawiki.com/index.php/Life\\_Data\\_Analysis\\_Reference](http://reliawiki.com/index.php/Life_Data_Analysis_Reference), свободный (дата обращения: 12.04.2016).
28. Гуревич Д. Ф. Трубопроводная арматура: Справочное пособие. – 2-е издание, переработанное и дополненное – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1981. — 368 с.
29. Гопал К. Дюбей. Основные принципы устройства электроприводов - М.: Высшая школа, 2009 – 490 с.



30. А.Б. Виноградов. Векторное управление электроприводами переменного тока – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2008 – 298 с.
31. Ю. Балабан-Ирменин. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей – М.: Новости теплоснабжения, 2008 – 288 с.
32. ОАО «НК «Роснефть». Технические требования на создание систем автоматизации – 2014 – 288 с.
33. А.В. Леоненков. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH – СПб: Издательство БХВ – Петербург, 2003 – 736 с.
34. Г.П. Фетисов. Материаловедение и технология металлов: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / М.Г.Карпман, В.М.Матюнин и др.– М.: Высш. шк., 2005. – 862 с.
35. Методология RCM-анализа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sov-system.ru/files/RCM-analysis.pdf>, свободный (дата обращения: 08.05.2016).
36. В.Ю. Конотопский. Финансовый менеджмент и ресурсоэффективности: учебно-методическое пособие. – Томск, изд-во ТПУ, 2013. – 54 с.
37. А.С. Булатова. Экономика: учебник для экономических академий, вузов и факультетов. – М.: Издательство БЕК, 1995. – 692 с.
38. И.Г. Видяев. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова. – Томск, изд-во ТПУ, 2014. – 36 с.
39. СанПиН 2.2.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений РФ. М.: 1996. – 55 с.
40. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 Гигиенические требования к естественному искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий РФ. М.: 2003. – 26 с.
41. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным ЭВМ и организации работы. М: 2003. – 55 с.
42. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования . М.: 1979. – 9 с.

**Приложение А**  
(обязательное)  
**Наборы данных об отказах**

Таблица А.1 – Данные отказов электропривода

№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)
1	32640	3234	98	30260	9368	195	17120	10067
2	35880	483	99	30360	8450	196	26070	10978
3	37045	1463	100	30390	8882	197	19650	10078
4	39760	876	101	30430	9889	198	12920	12145
5	40897	2057	102	30450	7941	199	12320	11005
6	42153	1343	103	30570	7829	200	23880	11529
7	43314	1776	104	31110	9879	201	27380	12189
8	43424	2760	105	32110	7570	202	18110	11488
9	43534	4229	106	31960	7640	203	25300	11983
10	33644	5444	107	32070	7829	204	27460	11477
11	43384	2471	108	32250	9661	205	23950	11423
12	42721	298	109	29610	9304	206	13760	11682
13	33934	1543	110	31700	7537	207	17190	10026
14	44054	1329	111	32340	9270	208	25780	10854
15	39560	4029	112	32530	8044	209	32600	11928
16	35540	3166	113	32620	7922	210	30030	12175
17	35200	4600	114	33530	8352	211	31560	11814
18	27360	1440	115	35560	8419	212	22290	12235
19	32290	4193	116	36700	9506	213	24690	11339
20	38610	2522	117	37490	8816	214	19770	11950
21	36250	3190	118	13450	9495	215	22770	10493
22	36530	3970	119	29110	7862	216	31590	11994
23	39030	4594	120	19300	8506	217	23350	12122
24	24040	3712	121	24550	7841	218	25530	11572
25	30870	4359	122	20570	7665	219	18210	11542
26	31360	3645	123	14380	8933	220	18100	10627
27	27430	4361	124	17830	8870	221	13110	11970
28	32430	3998	125	29410	8278	222	19210	11785
29	31130	4338	126	25310	9520	223	25130	10204
30	36790	3931	127	21850	8211	224	25930	12138
31	31710	2879	128	25140	9738	225	20050	10769
32	35370	3563	129	23450	9359	226	24160	11182
33	30370	3793	130	23810	8403	227	20790	10480
34	39420	4379	131	18700	10377	228	24830	12487
35	39920	2922	132	27140	11424	229	15910	11619
36	25710	3730	133	29600	12358	230	18600	10435
37	32100	2249	134	19700	11446	231	18960	10687
38	24130	7117	135	28310	10638	232	18580	12097
39	24680	6140	136	17500	10876	233	17540	10928
40	25230	7457	137	25070	11988	234	14080	10581
41	25780	6848	138	29240	10176	235	13240	10579
42	26330	5490	139	26110	11477	236	18170	12428
43	26880	7099	140	19040	10494	237	14220	10057

Продолжение таблицы А.1 – Данные отказов электропривода

№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)
44	27430	6252	141	30520	11611	238	18260	10380
45	27980	5069	142	26130	11511	239	21820	10023
46	28530	6431	143	26860	11103	240	25580	11610
47	29080	6328	144	29840	10991	241	19270	11036
48	29630	1108	145	25830	11480	242	8785	10227
49	30180	6644	146	23060	12374	243	17540	13882
50	30730	7105	147	35080	10979	244	21940	13805
51	31280	5275	148	15800	10463	245	27770	14260
52	32280	5785	149	22520	11436	246	21770	14329
53	32780	5715	150	23480	11568	247	16350	14786
54	33280	5351	151	15760	10124	248	11770	14492
55	33780	7087	152	24460	10651	249	19960	13487
56	35300	6501	153	29380	12238	250	23970	12632
57	35900	5632	154	24490	11821	251	19300	12502
58	36900	5004	155	25310	10984	252	17390	14390
59	37500	7016	156	22190	12260	253	14540	12887
60	16880	5526	157	27210	10970	254	17450	14176
61	18580	6383	158	18870	10884	255	22000	13365
62	19310	5284	159	28760	11863	256	21430	14495
63	19350	6881	160	18770	11849	257	30500	14954
64	19650	6359	161	22130	10500	258	6080	13238
65	20870	6092	162	34440	11701	259	20180	14686
66	21000	6741	163	22670	10920	260	9622	12752
67	21580	6092	164	28830	10274	261	9531	12858
68	21670	6445	165	19670	10508	262	10230	13272
69	22570	6572	166	27750	11637	263	24890	14535
70	22950	6260	167	24210	11719	264	9504	14535
71	23060	6739	168	25650	10199	265	13680	14745
72	23100	5475	169	23170	10070	266	16790	13173
73	23280	8863	170	18730	10768	267	23370	13073
74	23350	8522	171	21160	10357	268	11860	14687
75	23400	8664	172	19640	10170	269	18400	14612
76	23450	7882	173	19630	11812	270	23920	12602
77	23670	9345	174	18620	11735	271	17100	12959
78	23710	9567	175	23080	11637	272	9881	13623
79	23770	9683	176	26090	10246	273	13690	14736
80	24100	8250	177	24940	10124	274	6754	15555
81	24670	7818	178	26360	11160	275	17640	16400
82	24860	9462	179	22290	11820	276	18260	16059
83	25450	9024	180	17020	11700	277	15140	17160
84	25590	7681	181	30490	10930	278	19300	15669
85	25830	9135	182	9592	10125	279	17390	16704
86	26070	7762	183	18800	10424	280	14540	17397
87	26090	8068	184	20850	10776	281	17450	16971
88	26180	9800	185	27950	10531	282	22030	17046
89	28240	9157	186	19560	11212	283	21430	15339
90	28350	8731	187	16970	11100	284	30520	15050

Продолжение таблицы А.1 – Данные отказов электропривода

№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)
91	28350	8742	188	30470	11515	285	5280	16871
92	28540	8773	189	31920	11003	286	23180	17255
93	28630	9220	190	19120	12107	287	9622	16920
94	29880	9016	191	28000	11558	288	9531	16577
95	29880	7515	192	20100	10134	289	18180	16706
96	29890	7752	193	20410	12159	290	20180	16251
97	30230	9658	194	28200	10766			

Таблица А.2 – Данные отказов задвижки

№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)
1	19584	903	98	18138	5295	195	10272	6641
2	21528	1249	99	18156	4714	196	15642	7018
3	22227	1776	100	18216	5592	197	11790	6746
4	23856	1686	101	18234	4547	198	7752	7204
5	24538	1175	102	18258	5467	199	7392	6007
6	25292	1780	103	18270	4628	200	14328	6564
7	25988	1314	104	18342	5922	201	16428	7241
8	26054	1434	105	18666	4912	202	10866	7337
9	26120	1809	106	19266	5973	203	15180	6976
10	20186	1693	107	19176	4938	204	16476	7101
11	26030	1293	108	19242	5051	205	14370	7436
12	25633	1169	109	19350	4828	206	8256	6545
13	20360	1495	110	17766	4861	207	10314	7357
14	26432	1721	111	19020	5853	208	15468	6682
15	23736	1712	112	19404	5854	209	19560	7304
16	21324	2539	113	19518	4620	210	18018	6059
17	21120	2140	114	19572	4758	211	18936	7404
18	16416	2950	115	20118	5664	212	13374	6247
19	19374	1730	116	21336	4816	213	14814	6175
20	23166	2733	117	22020	4506	214	11862	6178
21	21750	1787	118	22494	4671	215	13662	6870
22	21918	2726	119	8070	4967	216	18954	7097
23	23418	1733	120	17466	4558	217	14010	7005
24	14424	2598	121	11580	4784	218	15318	7213
25	18522	1919	122	14730	4730	219	10926	7496
26	18816	2523	123	12342	5828	220	10860	6307
27	16458	2583	124	8628	4794	221	7866	6582
28	19458	1685	125	10698	5468	222	11526	6871
29	18678	2752	126	17646	5864	223	15078	7440
30	22074	2276	127	15186	5882	224	15558	6573
31	19026	2139	128	13110	7049	225	12030	6181
32	21222	2924	129	15084	6986	226	14496	6069
33	18222	2324	130	14070	6803	227	12474	7142
34	23652	2208	131	14286	6081	228	14898	6003
35	23952	3268	132	11220	6390	229	9546	6640
36	15426	3686	133	16284	7295	230	11160	6692

Продолжение таблицы А.2 – Данные отказов задвижки

№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)
37	19260	3146	134	17760	6131	231	11376	7124
38	14478	3142	135	11820	7064	232	11148	6839
39	14808	4397	136	16986	7296	233	10524	7383
40	15138	4342	137	10500	6440	234	8448	7285
41	15468	3341	138	15042	6967	235	7944	6736
42	15798	3616	139	17544	7243	236	10902	7121
43	16128	3942	140	15666	7308	237	8532	6384
44	16458	3677	141	11424	7369	238	10956	7188
45	16788	3897	142	18312	6660	239	13092	8320
46	17118	4282	143	15678	6531	240	15348	8284
47	17448	3937	144	16116	6642	241	11562	8999
48	17778	3849	145	17904	6001	242	5271	8801
49	18108	3276	146	15498	7160	243	10524	7720
50	18438	3833	147	13836	6135	244	13164	7927
51	18768	3364	148	21048	7026	245	16662	8961
52	19368	3907	149	9480	6231	246	13062	8575
53	19668	3877	150	13512	6073	247	9810	8468
54	19968	3742	151	14088	6028	248	7062	8604
55	20268	4111	152	9456	6971	249	11976	7687
56	21180	3931	153	14676	7371	250	14382	8063
57	21540	4207	154	17628	6648	251	11580	8873
58	22140	3864	155	14694	6364	252	10434	7548
59	22500	4367	156	15186	6981	253	8724	8173
60	10128	4091	157	13314	6034	254	10470	7843
61	11148	4002	158	16326	6208	255	13200	7735
62	11586	3473	159	11322	6826	256	12858	8253
63	11610	3459	160	17256	6695	257	18300	8632
64	11790	3163	161	11262	6451	258	3648	7820
65	12522	4277	162	13278	6514	259	12108	8657
66	12600	3232	163	20664	6912	260	5773	8335
67	12948	3119	164	13602	7477	261	5719	8778
68	13002	3961	165	17298	6226	262	6138	8308
69	13542	4843	166	11802	7067	263	14934	8804
70	13770	4844	167	16650	7163	264	5702	7842
71	13836	5314	168	14526	6932	265	8208	8057
72	13860	4581	169	15390	7032	266	10074	7552
73	13968	5287	170	13902	6851	267	14022	8097
74	14010	4642	171	11238	6822	268	7116	7987
75	14040	5837	172	12696	6370	269	11040	7802
76	14070	4720	173	11784	6739	270	14352	7688
77	14202	5897	174	11778	7005	271	10260	8841
78	14226	4571	175	11172	6935	272	5929	9399
79	14262	5005	176	13848	7198	273	8214	9970
80	14460	5098	177	15654	7483	274	4052	9395
81	14802	5919	178	14964	6944	275	10584	9690
82	14916	5301	179	15816	6887	276	10956	9527
83	15270	5540	180	13374	6758	277	9084	9715

Продолжение таблицы А.2 – Данные отказов задвижки

№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)	№	Время (ч)	Ресурс (циклы)
84	15354	4889	181	10212	6675	278	12733	9606
85	15498	5288	182	18294	7411	279	7390	9041
86	15642	5098	183	5755	6378	280	14540	9895
87	15654	5378	184	11280	7096	281	17450	9648
88	15708	5526	185	12510	6938	282	12030	9574
89	16944	5153	186	16770	6962	283	1430	9015
90	17010	4511	187	11736	6835	284	30520	10298
91	17010	5402	188	10182	6669	285	5280	10049
92	17124	5365	189	18282	7494	286	3180	9904
93	17178	4833	190	19152	6901	287	9622	9839
94	17928	4506	191	11472	6259	288	9531	9567
95	17928	4623	192	16800	6499	289	5180	10406
96	17934	5783	193	12060	6980	290	2180	10446
97	18138	5717	194	12246	5295		10272	

Таблица А.3 – Данные об отказах трубопроводов

№	Время (ч)	№	Время (ч)	№	Время (ч)	№	Время (ч)
1	110208	70	132840	139	93216	208	174312
2	117624	71	65808	140	91560	209	216744
3	140136	72	140136	141	96504	210	135672
4	162456	73	139416	142	88920	211	113184
5	165432	74	81984	143	167664	212	225216
6	124368	75	51144	144	107376	213	224976
7	123576	76	78744	145	222408	214	153504
8	164856	77	166464	146	217896	215	219432
9	33264	78	46224	147	186504	216	193176
10	74040	79	159984	148	76488	217	113736
11	144840	80	203040	149	180360	218	180624
12	142512	81	81672	150	91536	219	137184
13	144096	82	49872	151	163848	220	149160
14	153912	83	51936	152	92448	221	228336
15	60888	84	81048	153	94152	222	130248
16	148848	85	49752	154	161640	223	111504
17	149400	86	76608	155	195120	224	223776
18	128256	87	51696	156	200712	225	202968
19	129144	88	170208	157	188352	226	214944
20	125976	89	54984	158	108984	227	224184
21	150168	90	76080	159	164568	228	237744
22	124296	91	145200	160	207960	229	239112
23	39480	92	52392	161	110040	230	227928
24	42360	93	173904	162	167880	231	244680
25	129024	94	83616	163	207264	232	238824
26	75672	95	89352	164	193896	233	241776
27	76632	96	87768	165	102768	234	242616
28	57288	97	87576	166	119760	235	137856
29	136560	98	87240	167	208440	236	213672
30	135144	99	143952	168	206784	237	202920
31	84408	100	135984	169	216192	238	233712
32	150960	101	91992	170	163776	239	110040
33	152880	102	87864	171	159816	240	106416
34	131832	103	168912	172	202368	241	108672
35	63648	104	96024	173	194592	242	162312
36	43056	105	82776	174	229176	243	107040
37	72960	106	149112	175	227640	244	105144
38	43488	107	88680	176	199992	245	109872
39	46800	108	150576	177	189792	246	140160
40	39672	109	75120	178	100680	247	212232
41	61176	110	81744	179	211416	248	209880
42	68400	111	86088	180	164016	249	125448
43	101304	112	79032	181	105000	250	227760
44	156840	113	84504	182	219648	251	207168
45	76296	114	151512	183	117480	252	223560
46	52272	115	89160	184	115440	253	235320
47	44256	116	94416	185	103440	254	232272
48	43440	117	60384	186	217176	255	224424

Продолжение таблицы А.3 – Данные об отказах трубопроводов

№	Время (ч)	№	Время (ч)	№	Время (ч)	№	Время (ч)
49	163656	118	193416	187	197232	256	208128
50	161088	119	160848	188	102888	257	147624
51	61008	120	177624	189	187632	258	202800
52	68928	121	174600	190	100584	259	147384
53	70176	122	181944	191	218016	260	214752
54	42576	123	150936	192	163584	261	145824
55	63264	124	62952	193	220512	262	247248
56	70176	125	151992	194	146040	263	208824
57	136800	126	177840	195	218376	264	143976
58	43896	127	179064	196	148536	265	176664
59	131424	128	179400	197	147192	266	125856
60	63408	129	164784	198	121080	267	126048
61	47232	130	180216	199	224784	268	220080
62	50640	131	100488	200	190800	269	151176
63	177528	132	154032	201	107184	270	223776
64	134496	133	152904	202	118944	271	231312
65	87504	134	151464	203	154632	272	127488
66	45936	135	155856	204	191880	273	190056
67	138480	136	182736	205	232248		
68	67152	137	157776	206	201528		
69	69672	138	158856	207	169368		

Таблица А.4 – Данные об отказах блока управления

№	Время (ч)	№	Время (ч)	№	Время (ч)	№	Время (ч)
1	84	16	6813	31	15030	46	25670
2	136	17	8422	32	15070	47	26283
3	283	18	8632	33	16036	48	27654
4	334	19	9011	34	16657	49	27906
5	454	20	9061	35	16772	50	29248
6	563	21	9703	36	17692	51	29450
7	632	22	10517	37	19961	52	29991
8	1330	23	10860	38	20157	53	30132
9	1563	24	11655	39	21144	54	30181
10	2381	25	12160	40	21630	55	30855
11	4794	26	12456	41	22266	56	31550
12	5114	27	13720	42	22769	57	32170
13	5225	28	13899	43	23220	58	33493
14	5524	29	14152	44	24443	59	33720
15	6055	30	14593	45	25060	60	33840



**Приложение Б**  
(обязательное)  
**Результаты исследования (Электропривод)**

Таблица В.1 – Результаты аппроксимации данных об отказах электропривода  
для различных интервалов циклов наработки

Наработка в циклах	Наименование МН	Параметры МН
0-2500	Kw-CWG	$\alpha=1.2775$
		$\beta=10.5922$
		$\gamma=2.6262 \cdot 10^{-5}$
		a=1.7583
		b=0.4930
2500-5000	Kw-CWG	$\alpha=0.1639$
		$\beta=4.9375$
		$\gamma=3.9535 \cdot 10^{-5}$
		a=1.3269
		b=0.3485
5000-7500	Kw-CWG	$\alpha=0.0326$
		$\beta=5.1917$
		$\gamma=5.1783 \cdot 10^{-5}$
		a=0.5901
		b=0.1045
7500-10000	Kw-CWG	$\alpha=0.7197$
		$\beta=5.2706$
		$\gamma=5.2502 \cdot 10^{-5}$
		a=1.8187
		b=0.1281
10000-12500	Kw-CWG	$\alpha=0.0614$
		$\beta=2.9289$
		$\gamma=7.7684 \cdot 10^{-5}$
		a=0.9878
		b=0.2536
12500-15000	Kw-CWG	$\alpha=0.0944$
		$\beta=2.7115$
		$\gamma=8.5656 \cdot 10^{-5}$
		a=0.7881
		b=0.4293
15000-17500	Kw-CWG	$\alpha=0.1804$
		$\beta=1.5219$
		$\gamma=0.00014$
		a=1.7876
		b=0.677

**Приложение В**  
(обязательное)  
**Результаты исследования (Задвижка)**

Таблица Г.1 – Результаты аппроксимации данных об отказах запорно-регулирующей арматуры для различных интервалов циклов наработки

Наработка в циклах	Наименование МН	Параметры МН
0-1500	Kw-CWG	$\alpha=2.0654$
		$\beta=13.4528$
		$\gamma=4.5352 \cdot 10^{-5}$
		a=1.1331
		b=0.1798
1500-3000	Kw-CWG	$\alpha=2.4912$
		$\beta=9.996$
		$\gamma=5.258710^{-5}$
		a=1.2227
		b=0.27
3000-4500	Kw-CWG	$\alpha=0.259$
		$\beta=6.6013$
		$\gamma=7.4928 \cdot 10^{-5}$
		a=0.5469
		b=0.1075
4500-6000	Kw-CWG	$\alpha=1.1616$
		$\beta=5.7895$
		$\gamma=8.0694 \cdot 10^{-5}$
		a=2.0857
		b=0.1572
6000-7500	Kw-CWG	$\alpha=0.0913$
		$\beta=3.1124$
		$\gamma=0.00012$
		a=1.0227
		b=0.2402
7500-9000	Kw-CWG	$\alpha=0.0806$
		$\beta=2.6079$
		$\gamma=0.00015$
		a=0.8045
		b=0.4389
9000-10500	Kw-CWG	$\alpha=0.1988$
		$\beta=1.7761$
		$\gamma=0.00017$
		a=1.4095
		b=1.0143

## Приложение Г

(обязательное)

### Результаты исследования применимости моделей надежности

Таблица Г.1 – Результаты исследования применимости моделей надежности к данным об отказах электропривода и задвижки.

Модель надежности	Привод		Задвижка	
	Kw-CWG	J-shaped	Kw-CWG	J-shaped
Параметры	$\alpha=0.0614$ $\beta=2.9289$ $\gamma=7.77*10^{-5}$ $a=0.9878$ $b=0.2536$	$b=35441$ $v=6.211$	$\alpha=0.0913$ $\beta=3.1124$ $\gamma=0.00012$ $a=1.0227$ $b=0.2402$	$b=21269$ $v=6.163$
Критерий				
хи-квадрат Пирсона	$\chi^2 = 6.09$	$\chi^2 = 4.29$	$\chi^2 = 4.585$	$\chi^2 = 4.298$
$\alpha=0.1$	6.251	10.645	6.251	10.645
$\alpha=0.05$	7.815	12.592	7.815	12.592
$\alpha=0.01$	11.345	16.812	11.345	16.812
Колмогорова	$K=0.808$	$K=1.056$	$K=0.815$	$K=1.034$
$\alpha=0.1$	1.2238	1.2238	1.2238	1.2238
$\alpha=0.05$	1.3581	1.3581	1.3581	1.3581
$\alpha=0.01$	1.6277	1.6277	1.6277	1.6277
Крамера-Мизеса-Смирнова	$S_{\omega}=0.132$	$S_{\omega}=0.162$	$S_{\omega}=0.103$	$S_{\omega}=0.155$
$\alpha=0.1$	0.34737	0.34737	0.34737	0.34737
$\alpha=0.05$	0.46138	0.46138	0.46138	0.46138
$\alpha=0.01$	0.74345	0.74345	0.74345	0.74345
AIC	2239.29	2245.543	2124.882	2130.345
CAIC	2239.4	2246.109	2124.992	2130.911
BIC	2244.727	2259.136	2130.319	2143.938
HQIC	2241.496	2251.058	2127.088	2135.86

Таблица Г.2 – Результаты исследования применимости моделей надежности к данным об отказах блока управления и трубопроводов.

Модель надежности	Блок управления		Трубопроводы	
	Kw-CWG	J-shaped	Kw-CWG	J-shaped
Параметры Критерий	$\alpha=0.262$ $\beta=1.4471$ $\gamma=3.63 \cdot 10^{-5}$ $a=0.3884$ $b=0.182$	$b = 506296$ $v=0,7711$	$\alpha=0.067$ $\beta=0.5675$ $\gamma=3.63 \cdot 10^{-5}$ $a=2.9163$ $b=8.0883$	$b = 2617000$ $v= 2.826$
хи-квадрат Пирсона  $\alpha=0.1$ $\alpha=0.05$ $\alpha=0.01$	$\chi^2 = 2.02$  6.251 7.815 11.345	$\chi^2 = 5.077$  9.236 11.07 15.086	$\chi^2 = 13.75$  6.251 7.815 11.345	$\chi^2 = 12.48$  10.645 12.592 16.812
Колмогорова  $\alpha=0.1$ $\alpha=0.05$ $\alpha=0.01$	$K=0.212$  1.2238 1.3581 1.6277	$K=0.297$  1.2238 1.3581 1.6277	$K=0.91$  1.2238 1.3581 1.6277	$K=0.991$  1.2238 1.3581 1.6277
Крамера-Мизеса-Смирнова  $\alpha=0.1$ $\alpha=0.05$ $\alpha=0.01$	$S_{\omega}=0.409$  0.34737 0.46138 0.74345	$S_{\omega}=0.205$  0.34737 0.46138 0.74345	$S_{\omega}=0.295$  0.34737 0.46138 0.74345	$S_{\omega}=0.218$  0.34737 0.46138 0.74345
AIC CAIC BIC HQIC	1546.659 1546.735 1554.032 1549.633	1544.121 1544.163 1551.461 1547.062	6761.769 6761.994 6779.816 6769.013	6723.801 6723.846 6731.02 6726.699

## Приложение Д

(обязательное)

### Part 3

#### Fuzzy-value reliability performance measures for oil and gas equipment

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8AM41	Кармачев Денис Павлович		

Консультант кафедры АИКС:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ассистент каф. АИКС	Ефремов А.А.	-		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Старший пред. каф. ИЯИК	Логинова А.В.	-		

### **3 FUZZY-VALUE RELIABILITY PERFORMANCE MEASURES FOR OIL AND GAS FIELD EQUIPMENT**

This chapter of the study describes the research object and the application of fuzzy sets with a view to reliability through the example of the oil and gas equipment used in Rosneft Company. The research objects are electrically-driven gate valves with control unit (CU), and pipeline sections.

#### **3.1 Research object description**

Electrically-driven gate valves with control unit

The research object is a complex system that consists of three main components:

- 1) gate valve;
- 2) electric actuator (i.e. electric drive);
- 3) control unit.

A gate valve is a system element to control the fluid flow that stops the process fluid flow at a given location, usually for maintenance or safety purposes [28].

Based on the operating experience it can be noted that as a part of the gate valve-drive-control unit system, the gate valve is the most unreliable component. The mechanisms break frequently, since they are subjected to the rapid wear, due to the constant frictions of their parts. In addition, the characteristics of this component, which are specified in the data sheet, do not always correspond to the real values. As a result, the gate valve often breaks under the load torque effect of the drive in the process of closing. There are the following aggregate technical characteristics of one gate valve type that is used by the Company, and that define the requirements to the system component reliability:

- The mean time between failures (MTBF) should not be less than 16,000 hours, provided that the established resource values and operation modes are not exceeded.
- The assigned resource should not be less than 6000 open-close-open cycles.

- Temperature range: from +38 to -55 °C.

An electric actuator represented by an electric drive is a device used to automatize the pipeline valves. Typically, it is used for valve remote control and diagnostics [29].

An electric drive is a complex electromechanical device. Based on operating experience, the drive mounted on the valve, is claimed to be on average 1.8-2 times more reliable than the valve itself. However, details of the drives are also highly susceptible to the wear-out, so they demand an elaborate and regular maintenance and care. There are the following aggregate technical characteristics for one type of valve actuators that are used by the Company and define the requirements for the system component reliability:

- The mean time between failures (MTBF) should not be less than 30,000 hours, provided that the established resource values and operation modes are not exceeded.
- The assigned resource should not be less than 10000 open-close-open cycles.
- Temperature range: from +38 to -55°C.

The control unit is a device intended to control a valve actuator [30].

As a part of a complex system, CU is the most reliable component. The main control unit failures are associated with errors in hook-up and commissioning. The causes of these failures are completely eliminated in early stages of operation activity. There are the following aggregate technical characteristics for one type of control units that are used by the Company and define the requirements for the system component reliability:

- The mean time between failures (MTBF) should not be less than 60,000 hours, that the established resource values and operation modes are not exceeded.
- Temperature range: from +38 to -40 ° C.

In the present study, the reliability measure estimation for valves, valve actuators and control units is performed by the randomly generated sets of failure data. Information about system component failures were obtained by assessing the

operating experience of the equipment and by analysis of information on statutory specifications of the system components used in Rosneft. Technical characteristics were used for the analysis, only if their values were confirmed by experts involved in equipment operation.

There are two approaches to evaluate the components reliability of the system under study, distinguished by collected data. The first one implies the collection of component failure times (available for all system components). The second approach uses the number of operating cycles, performed before the failure (available for valves and valve actuators only). The acceptable temperature range for the control unit is relatively narrow. However, it is uncommon for the control unit to operate outside the predetermined range. Considering all of the above, in the present study, the reliability estimation was carried out according to the first approach. At the same time, the number of operating cycles is considered as a fuzzy number for valves and valve actuators.

This study was conducted to obtain fuzzy-value reliability measures, provided that the exact number of operating cycles is uncertain. In the future, a similar approach to analyze the actual data will help determine the joint influence of operating time and the number of cycles performed on the reliability of a complex system “valve-actuator-CU”.

### **Pipeline sections**

Pipelines constitute a major part of the main production assets. This results in a fact that about 90% of all failures are pipeline failures. The problem of finding reliable and optimal solutions in the field of pipeline transport is one of the most important issues for the Company. Information about failures of pipeline transport is very difficult to analyze since there is a variety of factors influencing the reliability of this type of equipment. In this work, the objects under study are the pipeline transport sections with similar characteristics (diameter, wall thickness, material, transported fluid). The object characteristics are presented in Table 3.1.



Table 3.1. Characteristics of pipelines

Diameter, mm	Thickness, mm	Material	Fluid	Laying method	Laying depth, m
114	9	steel 20	water-oil emulsion	underground	1.5

The pipelines under study are installed underground, so the impact of external factors is insignificant. All analyzed pipeline section failures occurred due to internal corrosion [31]. It is assumed that only the transported fluid characteristics (water-oil emulsion, WOE) affect the object reliability. Pressure, the amount of flowing fluid per day, water cut of WOE are constantly changing. Therefore, it is assumed that the identical sections of pipelines operate in different modes. Thus, in the present study we examine the applicability of the fuzzy set mathematical apparatus in order to obtain the fuzzy-value reliability measures. The fuzziness of parameters is directly related to indefinite, changing characteristics of the transported fluid.

#### **Data acquisition on failures**

The processes of data acquisition on equipment failure, operating modes and conditions are fully automated. These processes involve three interrelated systems:

- 6 Distributed Control System (DCS);
- 7 maintenance, repair, and operation system (MRO);
- 8 integrated management information system.

The distributed control system (DCS) is a process (or a plant) control system, the featured control elements which have been distributed throughout the system.

MRO system is designed for planning, preparation and implementation of maintenance and repair of various types at specified intervals. MRO systems contain guidelines on types and frequency of repairs carried out for each item. Also all information on performed maintenance and repairs is transferred into the system.

The integrated management information system (MES-level system) is a specialized software application designed to solve problems of synchronization, coordination, analysis and optimization of production processes.

The schematic diagram of failure data acquisition process is presented in Fig. 3.1.

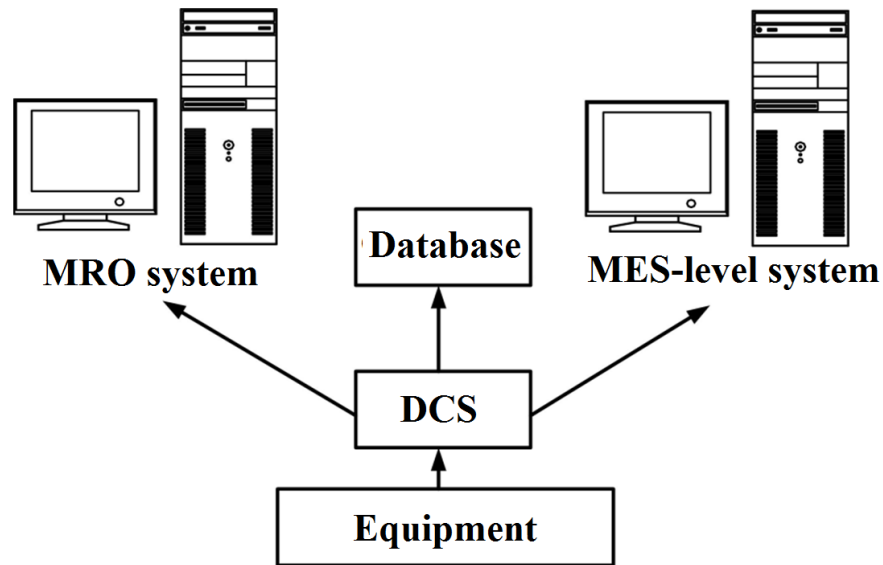


Fig. 3.1 - Failure data acquisition process

The Distributed Control System (DCS) records all the failures of computer integrated measuring devices, which are connected via the HART protocol. In addition, DCS records failures of equipment, which is connected via RS-485 or the Ethernet network interface. Then the information is transferred to MES-level and MRO system where it is registered in respective databases. In turn, MES-level system stores an essential information on equipment operating conditions (temperature, humidity, pressure, etc). The DCS database contains data on measured parameters and equipment operating modes.

Modern automated data collection methods in conjunction with the basic methods of data protection allow nullifying data falsification or concealing any information about failures in the Company. This is possible due to the direct automated transfer of failure information to MES-level system. The system notifies the heads of structural divisions about an emergency. In turn, employees are required to make an entry into MRO system, specifying the failure (or malfunction) cause in a timely manner.

In the current study, the standard forms of failure data reports were developed (Tables 3.2-3.8) to collect data on failures of valves and valve actuators from databases of the Company production facilities.

Table 3.2 reflects the complete list of electric and pneumatic actuators, which operate on a specific object of the Company.

Table 3.2. The list of actuators in use

ID *	Actuator type	Actuator brand	Commissioning date	ID of gate valve **

*Notes:*

\* *Unique arbitrary combination of numbers. If an actuator failure led to its complete replacement, the unique number must have a postscript, e.g.: 222\_1 - actuator, which was put into operation instead of no. 222;*

\*\* *Unique number, identifying the valve where the actuator is installed.*

Table 3.3 shows a complete list of electric and pneumatic actuator failures with a short description (failure cause, type and extent of the fault or error).

Table 3.3. Actuator failure data

ID	Failure date	Description

There is a full list of commands (open/close), that the actuator performs for the entire period of operation in Table 3.4 This information is necessary to determine the actuator performance to failure.

Table 3.4. Performed commands

ID	Performed command	Time and date

In order to exclude the information about failures that have been prevented, from the analysis, we also need the information about types of MRO, which were carried out (Table 3.5).

Table 3.5. Maintenance Information

ID	Commissioning date	Maintenance type	Maintenance description

Table 3.6 reflects the complete list of valves in use at a specific object of the Company.

Table 3.6. The list of valves in use

ID	Valve type	Valve brand	Commissioning date	ID of pipeline *

*Note: \* unique number, identifying the pipeline where the valve is installed.*

Table 3.7 shows a complete list of valve failures with a short description (failure cause, type and extent of the fault or error).

Table 3.7. Valve failure data

ID	Failure date	Description

Table 3.8 shows information about types of valve maintenance activities for the entire period of operation.

Table 3.8. Maintenance information

ID	Commissioning date	Maintenance type	Maintenance description

### 3.5 Further application of research results

As part of this chapter we were considered mathematical methods for evaluating the reliability of which are based on the failure occurrence patterns. Reliability indices calculated in this study can be used in conjunction with physical methods of evaluating the reliability, based on the study of physical and chemical processes, to improve the resiliency of equipment and systems used in the oil and gas industry.

Sophisticated and quite informative indicators of operational reliability are the foundation during the RCM-analysis [35]. Identifying the causes of failure and to determine their laws, including under conditions of uncertainty, to optimize for reliability and service processes. In other words, to define a set of actions that must be performed to ensure that a piece of equipment continued to work and perform their basic functions. In particular, the electric reliability indices and valves taking fuzzy meanings depending on the generated resource failures (in cycles), helping to link the

resource and time of use in a single indicator of reliability and a rough estimate of the degree of influence on the life time of a failure during operation.

With sufficient information about the characteristics of the environment influence the reliability of pipeline sections, the use of fuzzy sets in the calculation of indicators of operational reliability enables a detailed assessment of the extent of this impact on the resilience and to determine patterns of failure occurrence, depending on the characteristics of the flowing medium. Joint research experts of organic and inorganic chemistry, materials scientists and specialists of reliability theory allow accurately predict failures of pipelines and to take further action to improve the reliability of pipeline transport.

It is also an important application area of research results is a feasibility study in selecting pipes and valves with electric drive. Comparison of detailed and informative indicators of operational reliability of different brands of the same type of equipment allows the use of only the most reliable solutions in the choice of electrified valves and pipelines in the future.

It is important to note that the approaches to the production reliability, taking fuzzy values, which considered in the present study, can be applied in the calculation and assessment of the reliability of virtually any equipment operating in various modes and conditions of uncertainty.