

**ИТМО**

**З.А. Велеулов, И.Ю. Кинжагулов,  
А.В. Федоров, Д.Р. Фирюлин**

**НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ И СИСТЕМ**



**Санкт-Петербург  
2023**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**З.А. Велеулов, И.Ю. Кинжагулов,  
А.В. Федоров, Д.Р. Фирюлин**  
**НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ И СИСТЕМ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИТМО

по направлению подготовки 12.03.01 Приборостроение  
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования бакалавриата

**ИТМО**

Санкт-Петербург  
2023

Велеулов З.А., Кинжагулов И.Ю., Федоров А.В., Фирюлин Д.Р.,  
Надежность изделий и систем – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 184 с.

Рецензент(ы):

Аникейчик Николай Дмитриевич, кандидат технических наук, заместитель начальника департамента по хоздоговорным работам департамента научных исследований и разработок, Университета ИТМО.

В учебном пособии по дисциплине «Надежность изделий и систем» рассматриваются основные положения теории надежности и методы анализа надежности изделий и систем. Изложены вопросы обеспечения надежности изделий и систем при разработке, изготовлении и эксплуатации.

Учебное пособие состоит из трех глав.

Первая глава посвящена основным положениям теории надежности: таким как: понятия, термины и определения надежности.

Во второй главе рассматривается метод анализа дерева неисправностей (отказов), метод Марковского анализа и анализ видов, последствий и критичности отказов.

В третьей главе обсуждаются вопросы обеспечения надежности систем на различных этапах их жизненного цикла, приводятся материалы по оценке технического состояния систем.

Учебное пособие является полностью оригинальным авторским трудом, работа над которым велась с 2011 года. Учебное пособие предназначено для студентов-бакалавров, обучающихся по направлению подготовки «Приборостроение».

The logo of ITMO University, consisting of the letters 'ITMO' in a bold, black, sans-serif font. The letter 'I' is slightly taller than the other letters.

**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2023

© Велеулов З.А., Кинжагулов И.Ю., Федоров А.В., Фирюлин Д.Р., 2023

## Содержание

Перечень условных обозначений и сокращений .....	6
Введение .....	7
<b>1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ.....</b>	<b>9</b>
1.1 Основные понятия, термины и определения надежности .....	9
1.1.1 Надежность и техническое состояние системы, отказы и их классификация .....	10
1.1.2 Обеспечение надежности систем.....	14
1.2 Показатели надежности изделий и систем .....	19
1.2.1 Временные понятия надежности .....	19
1.2.2 Количественные показатели надежности .....	21
1.3 Законы распределения, используемые в теории надежности .....	32
1.3.1 Биноминальный закон .....	36
1.3.2 Закон Пуассона .....	36
1.3.3 Экспоненциальный закон .....	37
1.3.4 Нормальное распределение .....	41
1.3.5 Гамма-распределение .....	44
1.3.6 Распределение Вейбулла .....	46
1.3.7 Распределение Рэлея .....	48
1.3.8 О выборе закона распределения.....	49
<b>2 МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ .....</b>	<b>53</b>
2.1 Основные процедуры и методы анализа надежности .....	53
2.1.1 Основные процедуры анализа надежности .....	53
2.1.2 Классификация методов анализа надежности .....	58
2.1.3 Выбор метода анализа надежности .....	63
2.2 Метод структурной схемы надежности систем .....	64
2.2.1 Особенности применения метода структурной схемы надежности .....	64
2.2.2 Модели надежности системы .....	65
2.2.3 Расчет надежности системы.....	69
2.3 Метод анализа прочности и напряжений .....	75
2.4 Метод анализа дерева неисправностей (отказов) .....	78
2.4.1 Основные положения анализа дерева неисправностей (отказов)....	78
2.4.2 Правила и особенности реализации процедуры построения дерева неисправностей (отказов) системы .....	80
2.4.3 Построение математических моделей для расчета показателей надежности по дереву отказов .....	85
2.4.4 Основные математические выражения для расчета показателей надежности восстанавливаемой системы с известной ВФР .....	95
2.5 Метод Марковского анализа.....	96
2.5.1 Основные положения Марковского анализа .....	96

2.5.2	<i>Основные правила построения модели</i> .....	99
2.5.3	<i>Показатели надежности восстанавливаемых систем</i> .....	100
2.5.4	<i>Примеры применения Марковского метода</i> .....	102
2.6	<i>Прогнозирование интенсивности отказов</i> .....	111
2.6.1	<i>Основные положения метода «Прогнозирование интенсивности отказов»</i> .....	111
2.6.2	<i>Модели прогнозирования интенсивности отказов</i> .....	113
2.7	<i>Анализ видов, последствий и критичности отказов</i> .....	115
2.7.1	<i>Основные положения анализа видов, последствий и критичности отказов</i> .....	115
2.7.2	<i>Основные принципы АВПКО</i> .....	118
2.7.3	<i>Порядок АВПКО</i> .....	122
2.7.4	<i>Методы АВПКО</i> .....	126
3	<b>ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ</b> .....	130
3.1	<i>Обеспечение надежности систем при их разработке, производстве и эксплуатации</i> .....	130
3.1.1	<i>Факторы, влияющие на надежность систем</i> .....	131
3.1.2	<i>Основные пути обеспечения надежности на различных этапах жизненного цикла систем</i> .....	133
3.1.3	<i>Технические средства обеспечения надежности</i> .....	136
3.2	<i>Прогнозирование технического состояния систем</i> .....	139
3.2.1	<i>Классификация моделей и методов прогнозирования технического состояния</i> .....	140
3.2.2	<i>Модели дрейфа параметров</i> .....	144
3.2.3	<i>Оценка качества прогнозирования</i> .....	146
3.2.4	<i>Оценка остаточного ресурса при его назначении и продлении</i> .....	147
3.3	<i>Оценка надежности человека как звена сложной технической системы</i> 154	
3.3.1	<i>Понятие о надежности работы человека при взаимодействии техническими системами</i> .....	154
3.3.2	<i>Зависимость надежности работы человека от его психофизиологических свойств и уровня нагрузок</i> .....	156
3.3.3	<i>Показатели надежности деятельности человека-оператора</i> .....	157
3.3.4	<i>Оценка надежности системы «человек-машина»</i> .....	159
3.4	<i>Обеспечение надежности программного обеспечения</i> .....	162
3.4.1	<i>Отказы аппаратно-программных средств и основные проблемы исследования надежности программного обеспечения</i> .....	163
3.4.2	<i>Показатели надежности программного обеспечения</i> .....	166
3.4.3	<i>Проверка и испытания программ</i> .....	169
3.4.4	<i>Надежность сложных комплексов программ</i> .....	170
3.4.5	<i>Математические модели надежности комплексов программ</i> .....	171
3.5	<i>Обеспечение метрологической надежности информационно-измерительных комплексов</i> .....	175
3.5.1	<i>Классификация отказов средств измерений</i> .....	175
3.5.2	<i>Метрологическая надежность средств измерений</i> .....	176

3.5.3 Проблемы обеспечения метрологической надежности информационно-измерительных комплексов.....	178
Список литературы.....	182
Приложение А Таблица значений интегральной функции Лапласа .....	182
Приложение Б Таблица значений гамма-функции.....	183
Приложение В Интенсивность отказов изделий механического и электротехнического оборудования.....	184

## **Перечень условных обозначений и сокращений**

АВПКО – анализ видов, последствий и критичности отказов;  
АВПО – анализ видов и последствий отказов;  
АПС – аппаратно-программное средство;  
ВБР – вероятность безотказной работы;  
ВФ – вероятностная функция;  
ВФР – вероятностная функция работоспособности;  
ДНФ – дизъюнктивная нормальная форма;  
ДО – дерево отказов;  
ЗИП – запасные части, инструмент и принадлежности;  
ИК – измерительный канал;  
ИКК – информационно-измерительный комплекс;  
ЛВМ – логико-вероятностные методы;  
ЛФР – логическая функция работоспособности;  
МП – минимальный путь;  
МС – минимальное сечение;  
МХ – метрологическая характеристика;  
НТД – нормативно-техническая документация;  
ОДНФ – ортогональная дизъюнктивная нормальная форма;  
ПО – программное обеспечение;  
ПОН – программа обеспечения надежности;  
СДНФ – совершенная дизъюнктивная нормальная форма;  
СИ – средство измерения;  
ФАЛ – функция алгебры логики;  
ФПЗ – форма перехода к замещению;  
ТО – техническое обслуживание;  
ТП – технологический процесс.

## Введение

Понятие «надежность» давно используется в инженерной практике. Технические средства всегда создавались в расчете на заданный период их использования. Однако долгое время надежность изделий и систем не измерялась количественно, что значительно затрудняло ее объективную оценку. Для оценки надежности использовались качественные лингвистические оценки, такие как, высокая надежность или низкая надежность, и другие качественные показатели. Установление количественных показателей надежности, а также способов измерения их значений положило начало научным методам исследования надежности.

В развитии теории надежности необходимо выделить следующие основные направления.

1. Развитие математических основ теории надежности. Обобщение статистических данных об отказах и необходимость разработки рекомендаций по повышению надежности изделий и систем послужили своеобразным толчком для исследования математических закономерностей возникновения отказов, разработки моделей и методов количественной оценки надежности. Таким образом, возникла и формировалась математическая теория надежности – основа и исходный пункт создания науки о надежности.

2. Развитие методов сбора и обработки статистических данных о надежности. Необходимость по сбору и обработке статистических данных об отказах изделий и систем потребовала развития статистических методов, позволяющих рассчитывать характеристики их надежности и изучать закономерности возникновения отказов. Развитие данных методов послужили основой формирования статистической теории надежности.

3. Развитие физической теории надежности. Вопросы учета влияния деградиционных процессов старения и износа изделий и систем, а также внешних и внутренних воздействий на их надежность потребовали необходимости изучения физических причин отказов. Исследования физико-химических процессов, обуславливающих надежность изделий и систем, послужили основой развития физической теории надежности.

Вместе с развитием общей теории надежности возникли, разрабатывались и продолжают разрабатываться прикладные вопросы надежности – вопросы обеспечения надежности в конкретных отраслях техники (машиностроении и приборостроении, авиа- и ракетостроении, энергетике, судостроении и т.д.). Направления исследований в прикладной теории надежности направлены на поиск новых способов прогнозирования отказов и повышения надежности изделий и систем, совершенствование методов анализа надежности изделий и систем, обладающих все более сложной структурой с учетом действующих факторов, специфики и особенности техники.

В становлении и развитии всех перечисленных выше направлений теории и практики надежности выдающаяся роль принадлежит отечественным ученым: А.И. Бергу, Н.Г. Бруевичу, Б.В. Гнеденко, А.Д. Соловьеву, Ю.К. Беляеву, В.И.



Сидорову, Б.С. Сотскову. Огромный вклад в развитие отечественной школы надежности внесли Е.Ю. Барзилович, Т.А. Голинкевич, Г.В. Дружинин, В.А. Каштанов, И.М. Маликов, А.М. Половко, И.А. Рябинин, И.А. Ушаков, Г.Н. Черкесов, Я.Б. Шор, и многие др.

Несмотря на множество различных определений понятия «теория надежности» существующих в настоящее время, на наш взгляд, круг вопросов, входящих в компетенцию теории надежности, наиболее полно сформулировал академик А.И. Берг: «Теория надежности устанавливает закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности системы и ее элементов, рассматривает влияние внешних и внутренних воздействий на процессы в системах, создает основы расчета надежности и предсказания отказов, ищет способы повышения надежности (при конструировании и изготовлении систем и их элементов, а также способы сохранения надежности при эксплуатации)».

Теория надежности продолжает развиваться. В настоящее время существует много важных проблем, которые ожидают своего решения:

- «человеческий фактор» в надежности;
- надежность уникальных изделий;
- надежность глобальных территориальных и телекоммуникационных сетей и развивающихся систем;
- надежность программного обеспечения;
- обеспечение «метрологической» надежности.

Современные информационно-измерительные комплексы – сложные технические системы. Их сложность проявляется при проектировании, производстве и эксплуатации. Анализ и обеспечение надежности любой сложной технической системы – нетривиальная задача, решение которой зависит от целей определения надежности и имеющейся информации, используемых моделей, методов и методик.

Учебное пособие состоит из трех глав.

Первая глава посвящена основным положениям теории надежности: таким как: понятия, термины и определения надежности, показатели надежности изделий и систем, законы распределения, используемые в теории надежности.

Во второй главе рассматриваются методы анализа надежности систем, а именно: метод структурной схемы надежности систем, метод анализа дерева неисправностей (отказов), метод Марковского анализа и анализ видов, последствий и критичности отказов.

В третьей главе обсуждаются вопросы обеспечения надежности систем на различных этапах их жизненного цикла, приводятся материалы по оценке и прогнозированию технического состояния систем. Затрагиваются вопросы надежности человека, программного и метрологического обеспечений.

Учебное пособие содержит информацию, необходимую для выполнения практических и домашних заданий, подготовки к зачету по дисциплине «Надежность изделий и систем».

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

## 1.1 Основные понятия, термины и определения надежности

Надежность является одним из важнейших свойств, определяющих качество техники. Характерной чертой теории надежности является то, что процесс обеспечения надежности должен рассматриваться как единый процесс, охватывающий все этапы жизненного цикла (проектирование, производство, испытания и эксплуатация), и заключающийся в разработке мероприятий, направленных на достижение требуемого уровня надежности при минимальных затратах ресурсов.

Основные термины и понятия, используемые в теории надежности, регламентированы в соответствии с [23]. Терминология по надежности в технике распространяется на любые технические объекты, при этом под объектом понимается техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое на различных этапах жизненного цикла. Объектами могут быть различные системы и их элементы, в частности технические изделия, приборы и их части, агрегаты и отдельные детали, сложные технические системы и комплексы.

**Изделие** – любая функциональная единица, которую можно рассматривать в отдельности.

*Примерами изделий могут быть система, подсистема, оборудование, устройство, аппаратура, узел, деталь, элемент. Изделие может состоять из технических средств, программного обеспечения или их сочетания и может также в частных случаях включать людей. Группу изделий можно рассматривать как самостоятельное изделие.*

**Система** – совокупность элементов, объединенных конструкционно или функционально для выполнения некоторых требуемых функций.

Признаком системности является структурированность системы, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели. Системы функционируют в пространстве и времени.

**Составная часть** – рассматриваемая часть изделия.

**Элемент** – объект, представляющий составная часть системы, рассматриваемой при проведении анализа как единое целое, не подлежащее дальнейшему разукрупнению.

Понятия система и элемент выражены друг через друга. Понятие элемента условно и относительно, так как любой элемент, в свою очередь, всегда можно рассматривать как совокупность других элементов. Понятия система и элемент относительны: объект, считавшийся системой в одном исследовании, может рассматриваться как элемент, если изучается объект большего масштаба. Деление системы на элементы зависит от характера рассмотрения (функциональные, конструктивные, схемные или оперативные элементы), от требуемой точности проводимого исследования, от уровня

представлений исследователя, от объекта в целом. Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Например, информационно-измерительный комплекс (ИИК), при анализе его собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – различных средств измерений, передачи, сбора, хранения, обработки и отображения информации, а при изучении надежности автоматизированной системы управления, включающей в свой состав ИИК – как элемент.

### ***1.1.1 Надежность и техническое состояние системы, отказы и их классификация***

***Надежность*** – свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания.

*Данный термин используют только для общего неколичественного описания надежности.*

*В ранее действующем ГОСТ под **надежностью** понималось свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.*

В данном определении необходимо отметить следующие особенности:

- непрерывность выполнения объектом заданных функций;
- надежность определяется в заданных интервалах времени, зависящих от конкретных режимов и условий применения;
- на целевые функции объекта накладываются ограничения, обусловленные установленными пределами значений параметров (например, отказ отдельных элементов ИИК может ограничить выполнение ее функций – прием и отображение информации в реальном времени, воспроизведение измерительной информации и пр.).

***Готовность*** – способность изделия выполнить требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Надежность является комплексным свойством, зависящим от назначения системы и условий ее эксплуатации. Основными свойствами системы, обеспечивающими надежность, являются свойства безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости.

***Безотказность*** – способность изделия выполнить требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях.

*«Данные условия» могут включать климатические, технические или экономические обстоятельства. Обычно предполагают, что в начале интервала времени изделие в состоянии выполнить требуемую функцию.*

***Ремонтпригодность*** – способность изделия при данных условиях использования и технического обслуживания к поддержанию или

восстановлению состояния, в котором оно может выполнить требуемую функцию.

**Долговечность** – способность изделия выполнять требуемую функцию до достижения предельного состояния при данных условиях использования и технического обслуживания.

**Сохраняемость** – способность изделия выполнять требуемую функцию в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Для различных объектов эти свойства могут иметь различную значимость. Для неремонтируемых систем надежность включает в себя в основном безотказность. Для ремонтируемых объектов одним из важнейших свойств, составляющих надежность, является ремонтпригодность. Количественно надежность оценивается с помощью показателей, которые выбираются и определяются с учетом особенностей системы, режимов и условий ее эксплуатации и последствий отказов.

Одними из основных понятий надежности являются понятия, характеризующие возможные технические состояния системы и переходы между ними.

Под **техническим состоянием** понимается состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект [21]. К факторам, под воздействием которых изменяется техническое состояние объекта, можно отнести действия климатических условий, старение с течением времени, операции регулировки и настройки в ходе изготовления или ремонта, замену отказавших элементов и т. п.

Об изменении технического состояния объекта судят по значениям диагностических (контролируемых) параметров, позволяющих определить техническое состояние объекта без его разборки [21].

В соответствии с [23] рассматриваются следующие виды состояний изделий.

**Работоспособное состояние** – состояние изделия, при котором оно способно выполнить требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы.

*Изделие в одно и то же время может находиться в работоспособном состоянии для некоторых функций и в неработоспособном состоянии для других функций.*

**Неработоспособное состояние** – состояние изделия, при котором оно неспособно выполнить требуемую функцию по любой причине.

Согласно [23] различают:

– **неработоспособное состояние по внутренней причине:** Неработоспособное состояние изделия, при котором оно неспособно выполнить требуемую функцию из-за внутренней неисправности или профилактического технического обслуживания;

– **неработоспособное состояние по внутренней причине:** Неработоспособное состояние изделия, при котором оно неспособно выполнить требуемую функцию из-за внутренней неисправности или профилактического технического обслуживания.

**Неисправность (неисправное состояние)** – состояние изделия, характеризующееся неспособностью выполнить требуемую функцию, исключая такую неспособность во время профилактического технического обслуживания или других запланированных действий или из-за нехватки внешних ресурсов.

**Предотказное состояние** - состояние объекта, характеризующееся повышенным риском его отказа

Под **предельным состоянием** понимается состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по причинам опасности, экономическим или экологическим.

В соответствии с [23] рассматриваются дополнительно следующие виды состояний изделий:

– **состояние функционирования (рабочее состояние):** Состояние выполнения изделием требуемой функции;

– **состояние нефункционирования (нерабочее состояние):** Состояние невыполнения изделием ни одной из требуемых функций;

– **состояние готовности:** Состояние нефункционирования изделия в требуемое время;

– **свободное состояние:** Работоспособное состояние нефункционирования изделия в нетребуемое время;

– **занятое состояние:** Состояние изделия, при котором оно выполняет требуемую функцию для потребителя (потребителей) и по этой причине недоступно для других потребителей;

– **дежурное состояние:** Состояние изделия быть способным выполнить требуемую функцию по запросу;

– **критическое состояние:** Состояние изделия, которое может привести к тяжелым последствиям: травмированию людей, значительному материальному ущербу или неприемлемым экологическим последствиям.

– **опасное состояние:** состояние объекта, в котором возникает недопустимый риск причинения вреда людям, или окружающей среде, или существенных материальных потерь, или других неприемлемых последствий.

Объект из одного технического состояния в другое техническое состояние переходит из-за повреждения или отказа (рис. 1.1).

**Повреждение** – приемлемая для пользователя неполная способность изделия выполнить требуемую функцию.

**Отказ** – потеря способности изделия выполнить требуемую функцию.

*Отказ является событием, которое приводит к состоянию неисправности.*

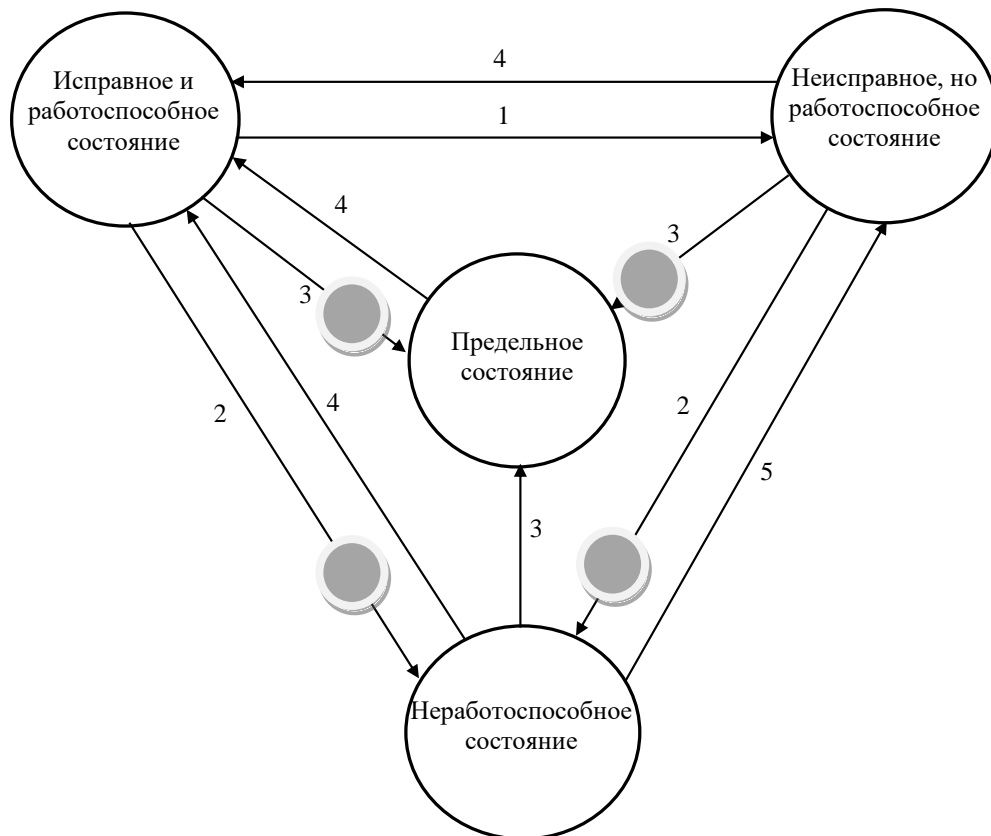


Рисунок 1.1 – Диаграмма графа переходов между видами технического состояния восстанавливаемой системы:

1 – повреждение; 2 – отказ; 3 – переход в предельное состояние;  
4 – восстановление исправности; 5 – восстановление работоспособности

Признаки (критерии) отказа – это заранее оговоренные признаки нарушения работоспособного состояния, по которым принимают решение о факте наступления отказа. При классификации отказов можно использовать такие понятия, как систематический отказ, полный отказ, частичный отказ.

Под систематическим отказом понимается многократно повторяющийся отказ, обусловленный неисправностями системы, заложенными при ее проектировании и изготовлении, полный отказ – система переходит в неработоспособное состояние, частичный отказ – отказ, после возникновения, которого система может быть использована по назначению, но с меньшей эффективностью.

По своей природе различают *случайные* отказы (отказы, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления) и *систематические* отказы (отказы, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия). При учете причинно-следственных связей различают *независимые* отказы (отказы, не обусловленные другими отказами) и *зависимые* отказы (отказы, обусловленные другими отказами).

Применительно к отказам необходимо рассматривать критерии, причину, характер и последствия. *Критерий* – это признак, позволяющий установить

факт нарушения работоспособности, *причина* – суть неисправности или отказа, заложенная на различных этапах жизненного цикла, *характер* – конкретные изменения в системе, связанные с возникновением отказа, *последствия* – результат отказа. Классифицировать отказы можно в соответствии с признаками, представленными в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация отказов

Признак классификации	Вид отказа
Характер изменения параметра (параметров) до момента возникновения отказа	Внезапный, постепенный
Обусловленность отказами других элементов системы	Независимый, зависимый
Характер проявления	Сбой (самоустраняющийся), перемежающийся, устойчивый
Наличие внешних проявлений	Очевидный (явный), скрытый (неявный)
Возможность использования по назначению после возникновения отказа	Полный, частичный
Этап жизненного цикла, на котором возникла причина отказа	Конструкционный, производственный, эксплуатационный
Время возникновения	В процессе функционирования, в процессе хранения, в процессе испытаний
Этап эксплуатации, на котором возник отказ	Приработка, нормальная эксплуатация, старение

### 1.1.2 Обеспечение надежности систем

Проблема повышения надежности решается только на этапах проектирования и производства. На этих этапах жизненного цикла уровень надежности системы закладывается [1]. При эксплуатации надежность системы повысить нельзя, ее уровень лишь уменьшается. Однако, существуют меры, поддерживающие требуемый уровень надежности и на этом этапе: техническое обслуживание (ТО) и ремонт. Классификация систем по возможностям поддержания их уровня надежности на этапе эксплуатации представлена в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Классификация систем по возможностям поддержания их уровня надежности

Признак классификации	Вид системы
По необходимости обслуживания	Обслуживаемая, необслуживаемая
По возможности восстановления работоспособного состояния	Восстанавливаемая, невосстанавливаемая
По возможности выполнения ремонта	Ремонтируемая, неремонтируемая

**Обслуживаемая система** – система, для которой проведение ТО предусмотрено в НТД.

**Восстанавливаемая система** – система, работоспособность которой в случае отказа подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации, а проведение восстановления предусмотрено в НТД.

**Невосстанавливаемая система** – система, работоспособность которой в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации и проведение восстановления не предусмотрено в НТД.

При постановке и решении задач надежности, особенно при выборе показателей надежности системы, существенное значение имеет решение, которое должно быть принято в случае отказа. Иногда одна и та же система может быть, в зависимости от этапов эксплуатации, восстанавливаемой или невосстанавливаемой. Однако чаще всего свойство восстанавливаемости рассматривается однозначно применительно ко всему периоду эксплуатации.

**Ремонтируемая система** – система, исправность и работоспособность которой в случае возникновения отказа или повреждения подлежит восстановлению, а проведение ремонта предусмотрено в НТД.

**Неремонтируемая система** – система, исправность и работоспособность которой в случае возникновения отказа или повреждения не подлежит восстановлению и проведение ремонта не предусмотрено в НТД.

Термины «невосстанавливаемая система» и «восстанавливаемая система» не заменяют собой понятия «ремонтируемая система» и «неремонтируемая система», т.к. последние характеризуют свойства системы (их приспособленность к ремонту и к техническому обслуживанию), а первые относятся к условиям восстановления работоспособности систем конкретной ситуации в процессе эксплуатации. В ряде случаев эти понятия совпадают. Например, неремонтируемая система обычно является и невосстанавливаемой, а ремонтируемая система может рассматриваться как невосстанавливаемой или как восстанавливаемой, в зависимости от условий эксплуатации.

Таким образом, под **обеспечением надежности** системы следует понимать совокупность организационно-технических и научно-методических мероприятий, направленных на достижение и поддержание заданного уровня надежности на всех этапах жизненного цикла.

Под **жизненным циклом системы** понимается непрерывный процесс, который начинается с момента принятия решения о необходимости создания системы и заканчивается в момент ее полного изъятия из эксплуатации.

В случаях, когда уровень надежности системы недостаточен, то повысить его можно путем введения избыточности – за счет резервирования.

**Резервирование** – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций.

Резервирование осуществляется при помощи резерва.

**Резерв** – совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования.

Основными понятиями при резервировании являются понятия основного, резервируемого и резервного элементов [10].



Классификация видов резервирования приведена в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Классификация видов резервирования

Признак классификации	Вид резервирования
По виду резерва	Структурное, временное, функциональное, нагрузочное, информационное
По способу переключения элементов	Постоянное, динамическое
По виду соединения резервных элементов	Общее, раздельное, скользящее, смешанное
По нагруженности резервных элементов до их включения	Нагруженный, облегченный, ненагруженный
По наличию восстановления элементов	С восстановлением, без восстановления

**Структурное резервирование** – резервирование, предусматривающее использование избыточных элементов структуры системы.

Наиболее часто применяемый вид резервирования, может быть постоянным и динамическим.

**Постоянное резервирование** – резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами, т.е. резервирование без перестройки структуры объекта при возникновении отказа его элементов (рис. 1.2а).

**Динамическое резервирование** – резервирование с перестройкой структуры объекта при возникновении отказа его элементов. Наиболее распространенный способ динамического резервирования – **резервирование замещением**, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента (рис. 1.2б).



Рисунок 1.2 – Структурная схема постоянного резервирования (а) и динамического резервирования замещением (б)

Структурное резервирование подразделяют на:

- **общее** – резервирование, при котором резервируется объект в целом (рис. 1.3);
- **раздельное** – резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы (рис. 1.4);
- **скользящее** – резервирование замещением, при котором группа основных элементов системы резервируется одним или несколькими

резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе (рис. 1.5);

– **смешанное** – сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте.

Одним из вариантов смешанного резервирования необходимо отметить **резервирование мажоритарное** (принцип голосования « $n$  из  $m$ » элементов) (рис. 1.6). Этот способ основан на применении дополнительного элемента – его называют мажоритарный или логический, или кворум-элемент. Он позволяет вести сравнение сигналов, поступающих от элементов, выполняющих одну и ту же функцию. Если результаты совпадают, тогда они передаются на выход устройства. На рис. 1.6 изображено резервирование по принципу голосования «два из трех», т.е. любые два совпадающих результата из трех считаются истинными и проходят на выход объекта. Главное достоинство этого вида резервирования – обеспечение повышения надежности при любых видах отказов работающих элементов. Любой вид одиночного отказа элемента не окажет влияния на надежность объекта в целом [13].

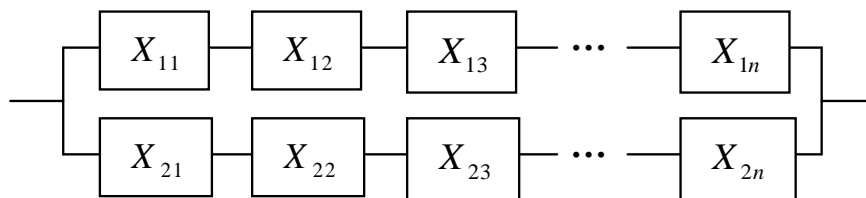


Рисунок 1.3 – Структурная схема при общем постоянном резервировании

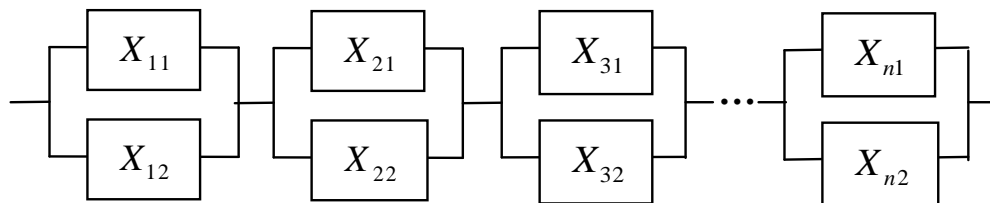


Рисунок 1.4 – Структурная схема при раздельном постоянном резервировании

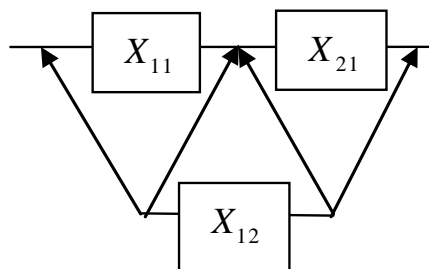


Рисунок 1.5 – Структурная схема при скользящем резервировании

При структурном резервировании необходимо учитывать **кратность резервирования** – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых или основных элементов системы. Резервирование, кратность которого равна единице называется **дублирование**.

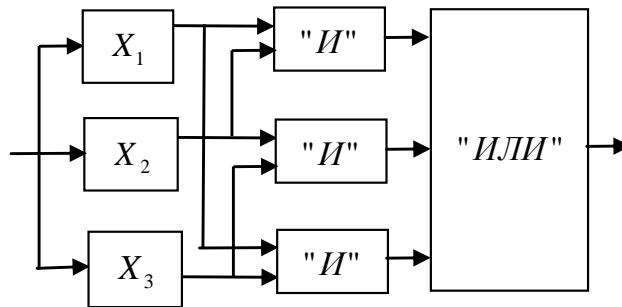


Рисунок 1.6 – Структурная схема при мажоритарном резервировании

Одним из видов резервирования является **нагрузочное резервирование**, которое предусматривает применение нагрузочных резервов, которые отличаются друг от друга по нагруженности резервных элементов. При этом различают:

- **нагруженный резерв** – резервный элемент, находящийся в том же режиме что и основной элемент;
- **облегченный резерв** – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент;
- **ненагруженный резерв** – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функции основного элемента.

По возможности восстановления различают:

- **резервирование с восстановлением** – резервирование, при котором восстановление отказавших основных и (или) резервных элементов технически возможно без нарушения работоспособности объекта в целом и предусмотрено эксплуатационной документацией;
- **резервирование без восстановления** – резервирование, при котором восстановление отказавших основных и (или) резервных элементов технически невозможно без нарушения работоспособности объекта в целом и (или) не предусмотрено эксплуатационной документацией.

Кроме структурного и нагрузочного резервирования широко применяются информационное, временное и функциональное резервирование.

**Информационное резервирование** предусматривает использование избыточной информации, **временное резервирование** – избыточного времени, а **функциональное резервирование** – способности элементов выполнять дополнительные функции.

Комплексное свойство надежность и объединяемые им более простые свойства количественно характеризуют показателями – величинами, значения которых определяют уровень данного свойства.

Значения показателей надежности системы в зависимости от условий обеспечения надежности могут изменяться на различных этапах ее жизненного цикла – в процессах проектирования, производства и эксплуатации.

## Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды резервирования вы знаете?
2. Что такое резерв замещением?
3. Как определить кратность резервирования?
4. Что такое постоянное резервирование?
5. Что такое «восстанавливаемая» техническая система (объект)?
6. Что такое «невосстанавливаемая» техническая система (объект)?
7. Что такое «ремонтируемая» техническая система (объект)?
8. Что такое «неремонтируемая» техническая система (объект)?

## Список литературных источников для самостоятельного изучения

1. Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. – СПб.: Лань, 2011. – 352 с.

### 1.2 Показатели надежности изделий и систем

Показатели надежности в основном представляют интервалы времени от некоторых определенных моментов времени (начало функционирования, начала эксплуатации, начало хранения и т.д.) до момента возникновения отказа или предельного состояния (для показателей безотказности, долговечности, сохраняемости), либо от моментов возникновения отказов или перехода в предельное состояние до моментов окончания восстановления работоспособного состояния (для показателей ремонтпригодности).

#### 1.2.1 Временные понятия надежности

В теории надежности используются следующие временные понятия надежности [23], которые в свою очередь являются и ее показателями.

**Наработка** – продолжительность или объем работы системы.

**Наработка до отказа** – наработка системы от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

**Наработка между отказами** – наработка системы от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа.

**Время восстановления** – продолжительность восстановления работоспособного состояния системы.

**Ресурс** – суммарная наработка системы от начала ее эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации системы или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

**Срок сохраняемости** – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции.

По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным нормативно-технической документацией на объект

**Остаточный ресурс** – суммарная наработка системы от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Аналогично вводятся понятия остаточной наработки до отказа, остаточного срока службы и остаточного срока хранения.

**Назначенный ресурс** – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация системы должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

**Назначенный срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

По истечении назначенного ресурса (срока службы, срока хранения) объект должен быть изъят из эксплуатации и должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей нормативно-технической документацией - направление в ремонт, списание, уничтожение, проверка и установление нового назначенного срока и т. д.

Перечисленные понятия относятся к конкретно взятому индивидуальному объекту. Имеется важное различие между величинами, определяемыми этими понятиями, и большинством величин, характеризующих механические, физические и другие свойства индивидуального объекта. Например, геометрические размеры, масса, температура, скорость и пр. могут быть измерены непосредственно (в принципе, в любой момент времени существования объекта). Нарботка индивидуального объекта до первого отказа, его наработка между отказами, ресурс и т.п. могут быть определены лишь после того, как наступил отказ или было достигнуто предельное состояние. Пока эти события не наступили, можно говорить лишь о прогнозировании этих величин с большей или меньшей достоверностью [14].

Ситуация осложнена из-за того, что наработка, ресурс, срок службы и срок сохраняемости зависят от большого числа факторов, часть которых не может быть проконтролирована, а остальные заданы с той или иной степенью неопределенности.

Цель установления назначенного срока службы и назначенного ресурса – обеспечить принудительное заблаговременное прекращение применения объекта по назначению, исходя из требований безопасности или технико-экономических соображений. Для объектов, подлежащих длительному

хранению, может быть установлен назначенный срок хранения, по истечении которого дальнейшее хранение недопустимо, например, из требований безопасности [17].

При достижении объемом назначенного ресурса (назначенного срока службы, назначенного срока хранения), и зависимости от назначения объекта, особенности эксплуатации, технического состояния и других факторов объект может быть списан, направлен в средний или капитальный ремонт, передан для применения не по назначению, переконсервирован (при хранении) или может быть принято решение о продолжении эксплуатации.

Назначенный срок службы и назначенный ресурс являются технико-эксплуатационными характеристиками объектов и не относятся к показателям надежности (показателям долговечности) [18]. Однако при установлении назначенного срока службы и назначенного ресурса принимают во внимание прогнозируемые (или достигнутые) значения показателей и надежности.

### ***1.2.2 Количественные показатели надежности***

Качественные показатели надежности указывают на то, что рассматриваемая система обладает каким-либо свойством, имеет то или иное устройство, способное выполнить поставленные задачи; дают возможность отличать системы друг от друга, но не позволяют сравнивать их по степени выполнения поставленной задачи, т.е. по надёжности.

Порядковые показатели надёжности дают возможность расположить в ряд по степени возрастания надежности, исследуемые варианты системы, но не позволяют оценить, на какую величину отличается достигнутый уровень надёжности рассматриваемых вариантов.

Количественные показатели надежности выражаются в виде числа, надежность измеряется или оценивается в принятой шкале оценок в абсолютных или относительных единицах при помощи этих показателей, количественные показатели определяются путем статических наблюдений на основе обработки результатов испытания или эксплуатации систем, а также путем аналитических расчетов или моделирования процессов функционирования систем. Они являются основными показателями надежности. Поэтому основное внимание уделим именно этим показателям.

Различают следующие типы показателей надежности:

***Единичный показатель надежности*** – показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность системы.

***Комплексный показатель надежности*** - показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность системы.

В отличие от единичного показателя надежности комплексный показатель надежности количественно характеризует не менее двух свойств, составляющих надежность, например безотказность и ремонтпригодность.

**Расчетный показатель надежности** – показатель надежности, значения которого определяются расчетным методом.

**Экспериментальный показатель надежности** – показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний.

**Эксплуатационный показатель надежности** – показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации.

**Экстраполированный показатель надежности** – показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполяции на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

Все показатели надежности в основном определяются как вероятностные характеристики. Это дает возможность прогнозирования значений этих показателей на этапе проектирования, при этом показатели надежности вводят по отношению к определенным режимам и условиям эксплуатации, установленным в НТД.

**1.2.2.1 Функция надежности. Интегральный и дифференциальный законы распределения наработки до отказа.** В [5] показано, что если рассмотреть систему, состоящую из двух элементов, состояние каждого из которых характеризуется одним основным параметром, то техническое состояние системы в целом можно рассматривать как точку с координатами  $(x_1; x_2)$  на плоскости определяющих параметров. Будем считать, что система работоспособна, если оба ее определяющих параметров имеют значения, обеспечивающие функционирование системы, а область параметров  $(X_1; X_2)$ , в которой система выполняет свои целевые функции, называют областью работоспособности (рис. 1.7).

Число параметров реальной системы велико, область параметров многомерно и состояние системы определяют как  $m$ -мерный вектор  $X_{\langle m \rangle}$  в пространстве параметров равных  $m$ . В общем случае область работоспособности многомерная криволинейная поверхность. Оперировать ими неудобно, поэтому в область работоспособности вписывают прямоугольную область допустимых параметров  $D$ . При этом условие работоспособности будет соответствовать отношению  $X_{\langle m \rangle} \in D$ . Вероятность отсутствия отказа системы в фиксированный момент времени определится по выражению

$$P = \text{Вер}(X_{\langle m \rangle} \in D), \quad (1.1)$$

а вероятность отказа системы может быть записана как

$$Q = \text{Вер}(X_{\langle m \rangle} \notin D). \quad (1.2)$$

Эти две вероятности характеризуют полную группу событий  $P + Q = 1$ .

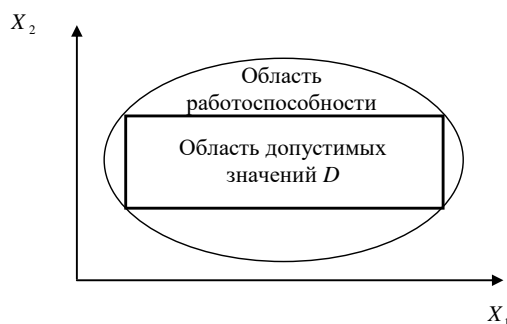


Рисунок 1.7 – Области работоспособности и допустимых значений

**Функцией надежности** называют функцию  $p(t)$ , выражающую вероятность того, что случайная наработка до отказа будет не менее заданной наработки, отсчитываемой от момента начала эксплуатации (рис. 1.8).

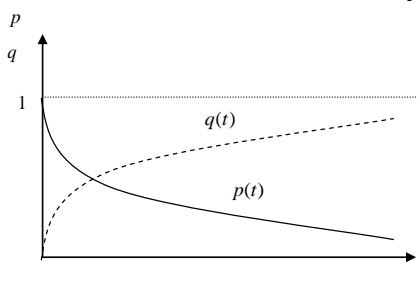


Рисунок 1.8 – Зависимости функций надежности и ненадежности от наработки

Функция надежности обладает следующими свойствами:

- $p(t=0) = p(0) = 1$  – в момент начала работы объект является безотказным;
- $p(t)$  – монотонно убывающая функция заданной наработки (с течением времени вероятность отказа любого объекта возрастает);
- $p(t \rightarrow \infty) \rightarrow 0$  – любой объект со временем откажет.

Статистическую оценку функции надежности можно найти по выражению

$$\tilde{p}(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N(t)}{N}, \quad (1.3)$$

где  $N$  – число однотипных изначально исправных объектов, поставленных на испытания;

$N(t)$  – число исправных объектов в момент времени  $t$  (неисправные объекты на исправные не заменяются).

Наряду с функцией надежности можно определить и обратную ей **функцию ненадежности**  $q(t) = 1 - p(t)$  (см. рис. 1.8), которая имеет все признаки интегрального закона ( $q(t=0) = q(0) = 0$ ,  $q(t)$  – монотонно возрастает,  $q(t \rightarrow \infty) \rightarrow 1$ ), и называется **интегральным законом распределения наработки до отказа**.



Наряду с функцией надежности и **интегральным законом распределения** часто используют **дифференциальный закон распределения наработки до отказа** или **плотность вероятности наработки до отказа**:

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}, \quad (1.4)$$

откуда

$$q(t) = \int_0^t f(t)dt, \quad p(t) = \int_0^\infty f(t)dt.$$

Статистическую оценку плотности вероятности наработки до отказа найти по выражению

$$\tilde{f}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0, N \rightarrow \infty} \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N\Delta t}, \quad (1.5)$$

где  $N$  – число однотипных изначально исправных объектов, поставленных на испытания;

$N(t) - N(t + \Delta t)$  – число отказавших объектов на интервале времени  $\Delta t$  (неисправные объекты заменяются на исправные).

**1.2.2.2 Показатели безотказности.** Наиболее широкое применение получили следующие показатели безотказности:

– вероятность безотказной работы (ВБР) в течение определенного времени:

- гамма-процентная наработка до отказа;
- средняя наработка до отказа;
- параметр потока отказов;
- интенсивность отказов.

**Вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Вероятность безотказной работы  $p(t)$  объекта в интервале  $[0; t_3]$  определяют как

$$p(t_3) = p(t \geq t_3) = 1 - q(t) = 1 - \int_0^{t_3} f(t)dt = \int_{t_3}^\infty f(t)dt, \quad (1.6)$$

где  $t$  – случайная наработка до отказа;

$t_3$  – заданная наработка объекта;

$f(t)$  – плотность вероятности наработки до отказа.

Вероятность безотказной работы  $p(t)$  является функцией наработки  $t$ . Обычно эту функцию предполагают непрерывной и дифференцируемой. Если способность объекта выполнять заданные функции характеризуется одним параметром  $x$ , то вместо (1.6) имеем формулу

$$p(t) = p(x^*(t_1) \leq x(t_1) \leq x^{**}(t_1)); \quad 0 < t_1 < t, \quad (1.7)$$

где  $x^*$  и  $x^{**}$  – предельные по условиям работоспособности значения параметров (эти значения, вообще, могут изменяться во времени).

Аналогично вводят ВБР в более общем случае, когда состояние объекта характеризуется набором параметров с допустимой по условиям работоспособности областью значений этих параметров.

Точечные статистические оценки для вероятности безотказной работы  $\tilde{p}(t)$  для функции распределения наработки до отказа  $\tilde{F}(t)$  определяются формулами:

$$\tilde{p}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}; \quad \tilde{q}(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (1.8)$$

где  $N$  – число объектов, работоспособных в начальный момент времени;  
 $n(t)$  – число объектов, отказавших на отрезке времени  $[0;t]$ .

Для получения достоверных оценок объем выборки  $N$  должен быть достаточно велик.

Определение безотказной работы в соответствии с формулой (1.6) относится к объектам, которые должны функционировать в течение некоторого конечного отрезка времени. Для объектов одноразового (дискретного) применения ВБР определяют как вероятность того, что при срабатывании объекта отказ не возникает. Аналогично вводят вероятность безотказного включения (например, в рабочий режим из режима ожидания).

**Гамма-процентная наработка до отказа** – наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Данный показатель определяют по формуле:

$$p(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100} = 1 - q(t_\gamma) \quad (1.9)$$

где  $p(t_\gamma)$  – вероятность безотказной работы;

$q(t_\gamma)$  – функция распределения наработки до отказа в момент времени  $t_\gamma$ .

Как видно из формулы (1.9), гамма-процентные показатели равны квантилям соответствующих распределений. Если вероятности, отвечающие этим квантилям, выражают в процентах, то для показателей безотказности обычно задают значения 90; 95; 99; 99,5 % и т.д. Тогда вероятности возникновения отказа на отрезке  $[0;t]$  будут соответственно составлять 0,10; 0,05; 0,01; 0,005 и т.д. Задаваемые значения  $\gamma$  для критических отказов должны быть весьма близки к 100%, чтобы сделать критические отказы практически невозможными событиями. Для прогнозирования потребности в запасных частях, инструментах и принадлежностях (ЗИП), а также для расчета его пополнения могут потребоваться гамма-процентные показатели при более низких значениях  $\gamma$ , например, при  $\gamma = 50\%$ . Статистические оценки для гамма-процентных показателей могут быть получены на основе статистических оценок либо непосредственно, либо после аппроксимации эмпирических функций подходящими аналитическими распределениями. Необходимо иметь в виду, что экстраполирование эмпирических результатов за пределы продолжительности испытаний (наблюдений) без привлечения дополнительной информации о физической природе отказов может привести к значительным

ошибкам. При  $\gamma = 100\%$ , гамма-процентная наработка называется *установленной безотказной наработкой*, а при  $\gamma = 50\%$  – *медианной наработкой*.

**Средняя наработка до отказа** – математическое ожидание наработки объекта отказа. Среднюю наработку до отказа  $\bar{T}_0$  вычисляют по формуле

$$\bar{T}_0 = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} [1 - q(t)]dt, \quad (1.10)$$

где  $q(t)$  – функция распределения наработки до отказа,

$f(t)$  – плотность распределения наработки до отказа.

С учетом (1.6)  $\bar{T}_0$  выражается через вероятность безотказной работы:

$$\bar{T}_0 = \int_0^{\infty} p(t)dt \quad (1.11)$$

Статистическая оценка для средней наработки до отказа определяется по выражению

$$\tilde{\bar{T}}_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j, \quad (1.12)$$

где  $N$  – число работоспособных объектов при  $t = 0$ ,

$\tau_j$  – наработка до первого отказа каждого из объектов.

**Средняя наработка на отказ** – отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Этот показатель введен применительно к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Очевидно, что это должны быть несуществующие отказы, не приводящие к серьезным последствиям и не требующие значительных затрат на восстановление работоспособного состояния. Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работать и продолжает работать до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособности, и объект вновь работает до отказа и т. д. На оси времени моменты отказов образуют поток отказов, а моменты восстановлений – поток восстановлений. На оси суммарной наработки (когда время восстановления не учитывается) моменты отказов образуют поток отказов. Полное и строгое математическое описание эксплуатации объектов по этой схеме построено на основе теории восстановления.

**Интенсивность отказов** – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемой наработки при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  определяют по формуле

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  определяют по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - q(t)} = -\frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt} \quad (1.13)$$

Статистическая оценка для интенсивности отказов  $\tilde{\lambda}(t)$  имеет вид

$$\tilde{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N\Delta t}, \quad (1.14)$$

где  $N$  – число объектов, работоспособных в начальный момент времени  $t = 0$ ;

$n(t)$  – число объектов, отказавших на отрезке  $[0; t]$ ;

$n(t + \Delta t)$  – число объектов, отказавших на отрезке  $[0; t + \Delta t]$ ;

Аналогично вводится интенсивность восстановления.

Все показатели безотказности определены как вероятностные характеристики. Их статистические аналоги определяют методами математической статистики.

### Пример 1.1

**Дано:**

1. На испытании находилось  $N=100$  образцов изделий.
2. Данные об статистике их отказов приведены в таблице:

Таблица 1.4 Данные о статистике отказов

t, час	t+Δt, час	n(t;t+Δt)
0	100	1
100	200	2
200	300	1
300	400	3
400	500	2
500	600	2
600	700	1
700	800	3

**Найти:**

Значения статистических показателей  $\tilde{p}(t), \tilde{f}(t), \tilde{\lambda}(t), \tilde{T}_0$  надежности по результатам испытаний.

**Решение:**

Таблица 1.5 – Решение задачи

t, час	t+Δt, час	n(t;t+Δt)	$t_j$ , час	n(t;t+Δt)	N(t;t+Δt)	$\tilde{p}(t)$	$\tilde{f}(t)$ , 1/час	$\tilde{\lambda}(t)$ , 1/час
0	100	1	50	1	99	0,99	1,00E-04	1,01E-04
100	200	2	150	3	97	0,97	2,00E-04	2,04E-04
200	300	1	250	4	96	0,96	1,00E-04	1,04E-04
300	400	3	350	7	93	0,93	3,00E-04	3,17E-04
400	500	2	450	9	91	0,91	2,00E-04	2,17E-04
500	600	2	550	11	89	0,89	2,00E-04	2,22E-04
600	700	1	650	12	88	0,88	1,00E-04	1,13E-04
700	800	3	750	15	85	0,85	3,00E-04	3,47E-04

$$1. \quad \tilde{p}(50) = \frac{N(50)}{N} = \frac{99}{100} = 0,99;$$

$$\tilde{p}(150) = \frac{N(150)}{N} = \frac{97}{100} = 0,97;$$

...

$$\tilde{p}(750) = \frac{N(750)}{N} = \frac{85}{100} = 0,85.$$

$$2. \quad \tilde{f}(50) = \frac{n(t; t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{1}{100 \cdot 100} = 1,00 \cdot 10^{-4} (\text{час}^{-1});$$

$$\tilde{f}(150) = \frac{n(t; t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{2}{100 \cdot 100} = 2,00 \cdot 10^{-4} (\text{час}^{-1});$$

...

$$\tilde{f}(750) = \frac{n(t; t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{3}{100 \cdot 100} = 3,00 \cdot 10^{-4} (\text{час}^{-1}).$$

$$3. \quad \tilde{\lambda}(50) = \frac{n(t; t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} = \frac{1}{\frac{100 + 99}{2} \cdot 100} = 1,01 \cdot 10^{-4} (\text{час}^{-1});$$

$$\tilde{\lambda}(150) = \frac{n(t; t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} = \frac{2}{\frac{99 + 97}{2} \cdot 100} = 2,04 \cdot 10^{-4} (\text{час}^{-1});$$

...

$$\tilde{\lambda}(750) = \frac{n(t; t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} = \frac{3}{\frac{88 + 85}{2} \cdot 100} = 3,47 \cdot 10^{-4} (\text{час}^{-1}).$$

$$4. \quad \tilde{T}_0 = \frac{1 \cdot 50 + 2 \cdot 150 + \dots + 3 \cdot 750}{15} = 436,67 (\text{час}).$$

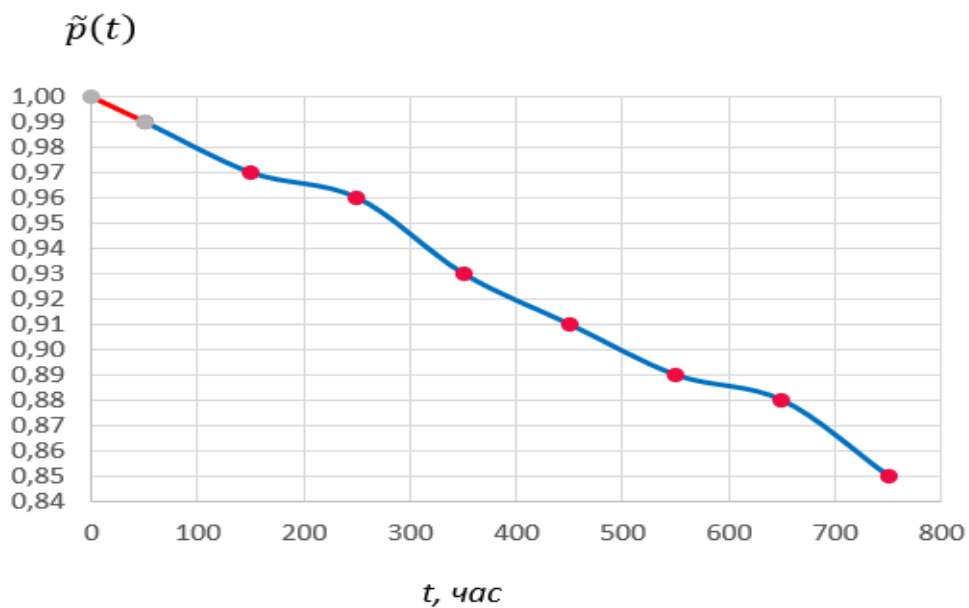


Рисунок 1.8 – График зависимости статистической оценки для вероятности безотказной работы от времени

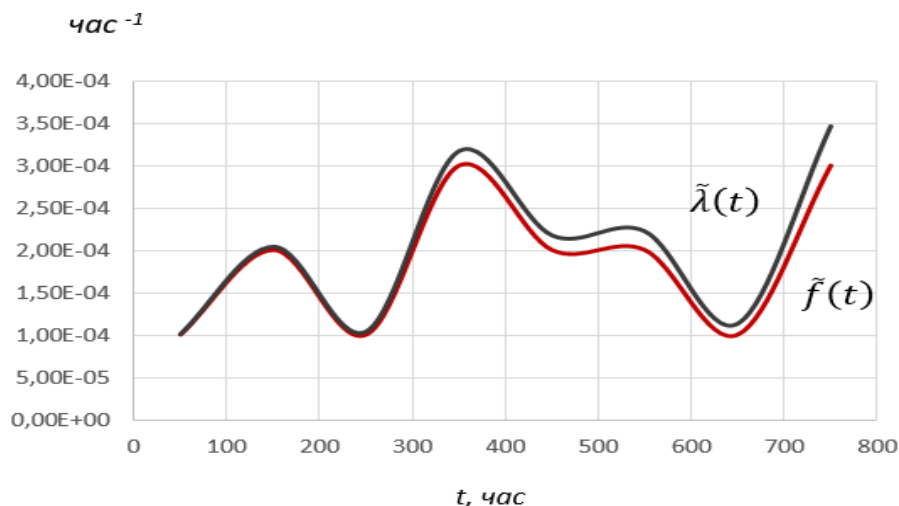


Рисунок 1.9 – График зависимости статистической оценки плотности распределения времени безотказной работы и статистической оценки интенсивности отказов от времени

### 1.2.2.3 Показатели долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

К показателям ремонтпригодности относятся:

- вероятность восстановления – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение;
- гамма-процентное время восстановления – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах;
- среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа;
- интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено;
- средняя трудоемкость восстановления – математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

Вероятность восстановления определяется по выражению

$$p_B(t_B) = p(t_B \leq t_{B_3}) = \int_0^{t_B} f(t_B) dt_B \quad (1.15)$$

где  $t_B$  – случайное время восстановления;

$t_{B_3}$  – заданное время восстановления;

$f(t_B)$  – плотность вероятности длительности восстановления.

Среднее время восстановления определяется по выражению

$$\bar{T}_B = \int_0^{\infty} t_B f(t_B) dt_B \quad (1.16)$$

Параметр потока восстановления – интенсивность восстановления  $\mu(t)$  определяется аналогично интенсивности отказов  $\lambda(t)$ .

**К показателям сохраняемости относятся:**

- гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемой объектом с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах;
- средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

**К показателям долговечности относятся:**

- гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженный в процентах;
- средний ресурс – математическое ожидание ресурса;
- гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах;
- средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

При использовании показателей долговечности следует указывать начало отсчета и вид действий после наступления предельного состояния (например, гамма-процентный ресурс от второго капитального ремонта до списания). Показатели долговечности, отсчитываемые от ввода объекта в эксплуатацию до окончательного снятия с эксплуатации, называются гамма-процентный полный ресурс (срок службы), средний полный ресурс (срок службы).

**1.2.2.4 Комплексные показатели надежности.** Комплексным показателем надежности объекта, характеризующим его безотказность и ремонтпригодность, является коэффициент готовности. **Коэффициент готовности** – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Различают стационарный  $K_r = K_r(\infty)$  и нестационарный коэффициенты готовности  $K_r(t)$ .

Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению по назначению только в отношении его работоспособности в произвольный момент времени.

Стационарный коэффициент готовности (предельное значение коэффициента готовности)  $K_r = K_r(\infty)$  определяется по формуле

$$K_r = \frac{\bar{T}_0}{\bar{T}_0 + \bar{T}_B}, \quad (1.17)$$

где  $\bar{T}_0$  – средняя наработка на отказ;

$\bar{T}_B$  – среднее время восстановления.

Наряду с коэффициентом готовности часто используется такой показатель как **коэффициент простоя** – вероятность застать систему в неисправном состоянии

$$K_{II}(t) = 1 - K_G(t); \quad (1.18)$$

$$K_{II} = 1 - K_G. \quad (1.19)$$

Для одного ремонтируемого объекта стационарный коэффициент готовности можно определить по выражению

$$K_G = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n \tau_i}, \quad (1.20)$$

где  $t_i$  – время сохранения работоспособности в  $i$ -м цикле функционирования объекта;  $\tau_i$  – время восстановления (ремонта) после  $i$ -го отказа объекта.

Коэффициент готовности показывает какую часть времени объект находится в работоспособном состоянии.

**Коэффициент технического использования** – отклонение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за этот период.

Коэффициент технического использования равен отношению математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период эксплуатации:

$$K_{ТИ} = \frac{\bar{T}_0}{\bar{T}_0 + \bar{T}_B + \bar{T}_{ТО}}, \quad (1.21)$$

где  $\bar{T}_{ТО}$  – средняя длительность ТО.

Для одного ремонтируемого объекта коэффициент использования можно определить по выражению

$$K_{ТИ} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i + \sum_{j=1}^k \tau_j}, \quad (1.22)$$

где  $t_i$  – время сохранения работоспособности в  $i$ -м цикле функционирования объекта;

$\tau_i$  – время восстановления (ремонта) после  $i$ -го отказа объекта;

$\tau_j$  – длительность выполнения  $j$ -го ТО (профилактики), требующего вывода объекта из работающего состояния (использования по назначению);

$n$  – число рабочих циклов за рассматриваемый период эксплуатации;



$m$  – число отказов (восстановлений) за рассматриваемый период;  
 $k$  – число профилактик, требующих отключения объекта в рассматриваемый период.

Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации.

**Коэффициент оперативной готовности** – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Из вероятностного определения следует, что

$$K_{ог} = K_{г} p(t), \quad (1.23)$$

где  $p(t)$  – вероятность безотказной работы объекта в течение времени  $t$ , необходимого для безотказного использования по назначению.

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа в течение заданного интервала времени.

**Коэффициент сохранения эффективности** – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

Коэффициент сохранения эффективности может быть определен по выражению

$$K_{э} = \frac{П_{эР}}{П_{эН}}, \quad (1.24)$$

где  $П_{эР}$ ,  $П_{эН}$  – показатели реальной и номинальной эффективности объекта.

### 1.3 Законы распределения, используемые в теории надежности

В предыдущем параграфе отмечалось, что в качестве основных показателей надежности (безотказности) изделий и систем используются:  $p(t)$  – вероятность безотказной работы изделия на интервале времени от 0 до  $t$ ;  $q(t)$  – вероятность отказа изделия на интервале времени от 0 до  $t$ ;  $f(t)$  – частота отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы изделия;  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов изделия (условная плотность вероятности отказов);  $\bar{T}_0$  – среднее время безотказной работы изделия или среднее время наработки до отказа.

Для решения задач по оценке надежности и прогнозированию работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель,

которая была бы представлена аналитическими выражениями одного из показателей  $p(t)$ , или  $f(t)$ , или  $\lambda(t)$ . Учитывая тот факт, что законы распределения наработки различных изделий и систем до отказа зависят от их особенностей, то, по-видимому, они будут иметь различный вид. Основной путь получения модели состоит в проведении испытаний, вычислении статических оценок и их аппроксимации аналитическими функциями. Типичная функция интенсивности отказов невосстанавливаемых объектов изображена на рис. 1.9.

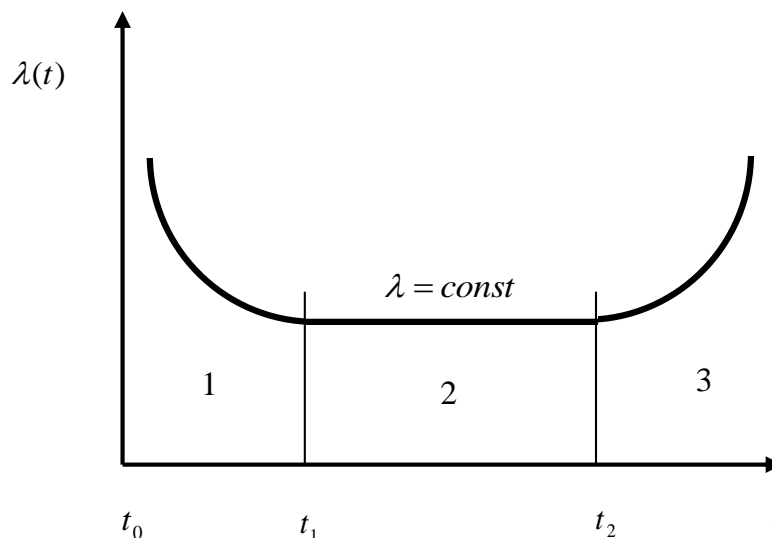


Рисунок 1.10 - Функция интенсивности отказов:

1 – участок приработки; 2 – участок нормальной эксплуатации; 3 – участок старения

При этом необходимо выделить (см. рис. 1.9) три участка для данной функции, характеризующих особенности этапа эксплуатации объекта: участок приработки, участок нормальной эксплуатации и участок старения.

В теории надежности наибольшее распространение получили следующие законы распределения  $f(t)$ :

- для дискретных (прерывного типа) случайных величин – биномиальный закон и закон Пуассона;
- для непрерывных случайных величин – экспоненциальный закон, нормальный закон, гамма-распределение, закон Вейбулла и распределение Рэлля [7].

**Дискретной (прерывной) величиной** называют случайную величину, которая принимает отдельные, изолированные возможные значения с определенными вероятностями. Число возможных значений дискретной случайной величины может быть конечным или бесконечным.

**Непрерывной величиной** называют случайную величину, которая может принимать все значения из некоторого конечного или бесконечного промежутка. (Число возможных значений непрерывной случайной величины бесконечно).

**Пример 1.2****Дано:**

1. На испытании находилось  $N=100$  образцов изделий.
2. Данные об статистике их отказов приведены в таблице:

Таблица 1.6 – Статистика отказов образцов изделий

t, час	t+Δt, час	n(t;t+Δt)	n(t+Δt)	N(t+Δt)
0	50	16	16	84
50	100	12	28	72
100	150	4	32	68
150	200	4	36	64
200	250	3	39	61
250	300	4	43	57
300	350	3	46	54
350	400	3	49	51
400	450	4	53	47
450	500	3	56	44
500	550	3	59	41
550	600	4	63	37
600	650	3	66	34
650	700	5	71	29
700	750	13	84	16
750	800	16	100	0

**Найти:**

Значения статистических показателей  $\tilde{p}(t), \tilde{f}(t), \tilde{\lambda}(t), \tilde{T}_0$  надежности по результатам испытаний.

**Решение:**

Таблица 1.7 – Решение задачи

$t_j$ , час	$\tilde{p}(t)$	$\tilde{f}(t)$ , 1/час	$\tilde{\lambda}(t)$ , 1/час
25	0,84	3,20E-03	3,48E-03
75	0,72	2,40E-03	3,08E-03
<b>125</b>	<b>0,68</b>	<b>8,00E-04</b>	<b>1,14E-03</b>
<b>175</b>	<b>0,64</b>	<b>8,00E-04</b>	<b>1,21E-03</b>
<b>225</b>	<b>0,61</b>	<b>6,00E-04</b>	<b>9,60E-04</b>

Продолжение таблицы 1.7

$t_j$ , час	$\tilde{p}(t)$	$\tilde{f}(t)$ , 1/час	$\tilde{\lambda}(t)$ , 1/час
275	0,57	8,00E-04	1,36E-03
325	0,54	6,00E-04	1,08E-03
375	0,51	6,00E-04	1,14E-03
425	0,47	8,00E-04	1,63E-03
475	0,44	6,00E-04	1,32E-03
525	0,41	6,00E-04	1,41E-03
575	0,37	8,00E-04	2,05E-03
625	0,34	6,00E-04	1,69E-03
675	0,29	1,00E-03	3,17E-03
725	0,16	2,60E-03	1,16E-02
775	0,00	3,20E-03	4,00E-02

$$\tilde{T}_0 = 280,5 \text{ (час)}$$

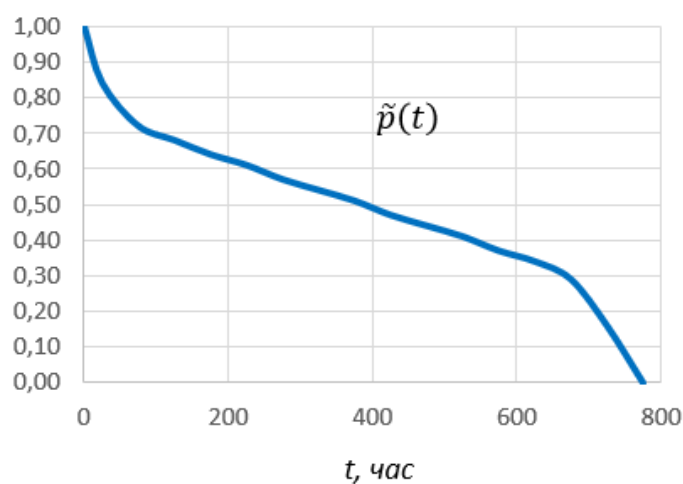


Рисунок 1.11 – График зависимости статистической оценки для вероятности безотказной работы от времени

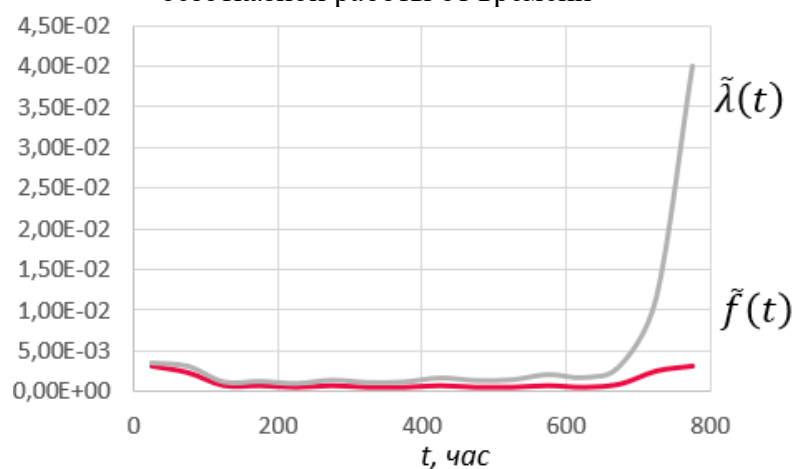


Рисунок 1.12 – График зависимости статистической оценки плотности распределения времени безотказной работы и статистической оценки интенсивности отказов от времени

### 1.3.1 Биномиальный закон

Биномиальный закон распределения характеризует закон распределения числа  $n$  появления события  $A$  в  $m$  независимых испытаниях (опытах). Если вероятность появления события  $A$  в одном испытании равна  $p$ , вероятность не появления события  $A$  равна  $q = 1 - p$ ; число независимых испытаний равно  $m$ , то вероятность появления  $n$  событий в  $m$  испытаниях определяется по выражению

$$P_m^n = C_m^n p^n (1-p)^{m-n}, \quad (1.25)$$

где  $C_m^n$  – число сочетаний из  $m$  по  $n$ .

Свойства распределения:

- число событий  $n$  – целое положительное число;
- математическое ожидание числа событий  $n$  раз  $M(n) = mp$ ;
- дисперсия частоты появления события  $n$  раз  $D(n) = mpq$ ;
- среднее квадратическое отклонение числа событий  $\sigma(n) = \sqrt{mpq} = \sqrt{mp(1-q)}$ .

При увеличении числа испытаний биномиальное распределение приближается к нормальному со средним значением  $n/m$  и дисперсией  $\frac{p(1-p)}{m}$ .

### 1.3.2 Закон Пуассона

Закон Пуассона – распределение чисел случайного события  $n_i$  за время  $t$ . Вероятность возникновения случайного события  $n_i$  за время  $t$  определяется по формуле:

$$P(t; n) = (\lambda t)^n \frac{e^{-\lambda t}}{n!}. \quad (1.26)$$

Распределение Пуассона является однопараметрическим с параметром  $\lambda$ .

Свойства распределения, следующие:

- математическое ожидание и дисперсия случайной величины равны параметру распределения  $M = D = \lambda$ ;
- среднее квадратическое отклонение числа событий  $\sigma = \sqrt{\lambda t}$ .

Характерный признак распределения Пуассона – равенство математического ожидания и дисперсии. Это свойство используется для проверки степени соответствия исследуемого (опытного) распределения с распределением Пуассона. Распределение Пуассона описывает закономерность появления случайных отказов в сложных системах и используется тогда, когда необходимо определить вероятность того, что в изделии за заданное время произойдет один, два, три и т.д. отказов. Этот закон нашел широкое применение при определении вероятности появления и восстановления отказов и играет ключевую роль в теории массового обслуживания.

### 1.3.3 Экспоненциальный закон

Экспоненциальное (показательное) распределение описывает наработку до отказа объектов, у которых в результате испытаний (выходного контроля) отсутствует период приработки, а назначенный ресурс установлен до окончания периода нормальной эксплуатации. Эти объекты можно отнести к «не стареющим», поскольку они работают только на участке  $\lambda(t) = \lambda = const$ .

Для экспоненциального закона распределения (рис. 1.11):

$$p(t) = e^{-\lambda t}; \quad (1.27)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad (1.28)$$

$$M_t = \bar{T}_0 = \frac{1}{\lambda}; \quad (1.29)$$

$$D_t = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (1.30)$$

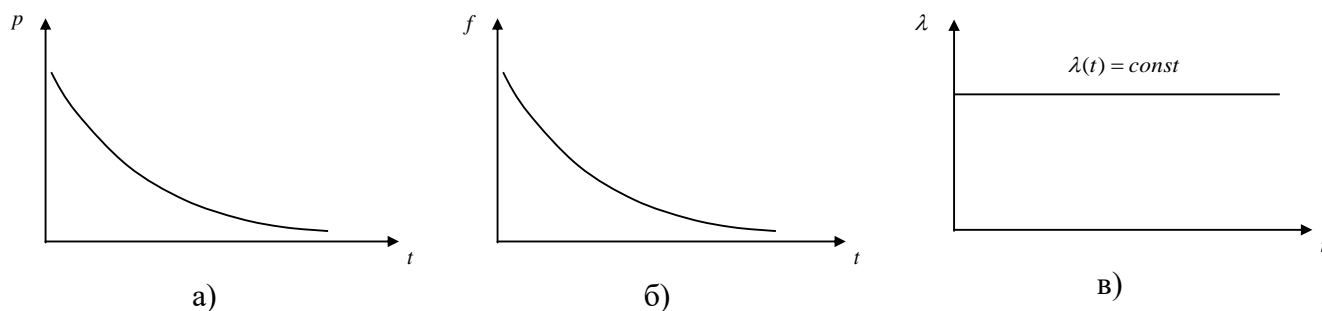


Рисунок 1.13 – Типичные зависимости характеристик надежности для экспоненциального распределения

Равенство среднеквадратического отклонения среднему времени работы - характерный признак экспоненциального распределения:  $\sigma_t = M_t$ , где  $\sigma_t$  - среднеквадратическое время работы. Статистические материалы об отказах элементов свидетельствуют о том, что в основном время их работы подчиняется экспоненциальному закону распределения. Условием возникновения экспоненциального закона распределения времени до отказа служит постоянство интенсивности отказов, что характерно для внезапных отказов на интервале времени, когда период приработки объекта закончился, а период износа и старения еще не начался, т.е. для нормальных условий эксплуатации. Постоянной становится интенсивность отказов сложных объектов, если вызываются они отказами большого числа комплектующих элементов, при этом плотность вероятности времени наработки до отказа описывается различными законами распределения. Время возникновения первичных отказов может быть расположено на оси времени так, что суммарный поток отказов сложного изделия становится близким к простейшему, т.е. с постоянной интенсивностью отказов.

Этими обстоятельствами, а также тем, что предположение об экспоненциальном распределении существенно упрощает расчеты надежности, объясняется широкое применение экспоненциального закона в инженерной практике.

### Пример 1.3

Дано:

1. В результате наблюдения за 72 образцами изделий, которые прошли предварительную 100-часовую приработку, получены данные до первого отказа образцов (см. Пример 2).
2. Данные об статистике их отказов приведены в таблице:

Таблица 1.8 – Статистика отказов изделий

t, час	t+Δt, час	n(t;t+Δt)
0	50	16
50	100	12
<b>100</b>	<b>150</b>	<b>4</b>
<b>150</b>	<b>200</b>	<b>4</b>
<b>200</b>	<b>250</b>	<b>3</b>
<b>250</b>	<b>300</b>	<b>4</b>
<b>300</b>	<b>350</b>	<b>3</b>
<b>350</b>	<b>400</b>	<b>3</b>
<b>400</b>	<b>450</b>	<b>4</b>
<b>450</b>	<b>500</b>	<b>3</b>
<b>500</b>	<b>550</b>	<b>3</b>
<b>550</b>	<b>600</b>	<b>4</b>
<b>600</b>	<b>650</b>	<b>3</b>
<b>650</b>	<b>700</b>	<b>5</b>
<b>700</b>	<b>750</b>	<b>13</b>
<b>750</b>	<b>800</b>	<b>16</b>

Найти:

1. Значения статистических показателей  $\tilde{p}(t)$ ,  $\tilde{\lambda}(t)$ ,  $\tilde{T}_0$  надежности по результатам испытаний.
2. Закон распределения наработки до отказа для этапа нормальной эксплуатации.
3. Значения  $\lambda$ ,  $\bar{T}_0$  и  $T_{\gamma=80\%}$  по выбранному закону.

Решение:

Таблица 1.9 – Решение задачи

$t_j$ , час	$\tilde{p}(t)$	$\tilde{\lambda}(t)$ , 1/час	$p(t)$
25	0,94	1,14E-03	0,97
75	0,89	1,21E-03	0,90
125	0,85	9,60E-04	0,84
175	0,79	1,36E-03	0,79
225	0,75	1,08E-03	0,74
275	0,71	1,14E-03	0,69
325	0,65	1,63E-03	0,64
375	0,61	1,32E-03	0,60
425	0,57	1,41E-03	0,56
475	0,51	2,05E-03	0,52
525	0,47	1,69E-03	0,49
<b>575</b>	<b>0,40</b>	<b>3,17E-03</b>	<b>0,46</b>
<b>625</b>	<b>0,22</b>	<b>1,16E-02</b>	<b>0,43</b>
<b>675</b>	<b>0,00</b>	<b>4,00E-02</b>	<b>0,40</b>

$$\tilde{T}_0 = 443,75 \text{ час};$$

$$\lambda = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1};$$

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{\lambda};$$

$$\bar{T}_0 = 733,36 \text{ час};$$

$$T_\gamma = -\frac{\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)}{\lambda};$$

$$T_{80\%} = 163,63 \text{ час}.$$

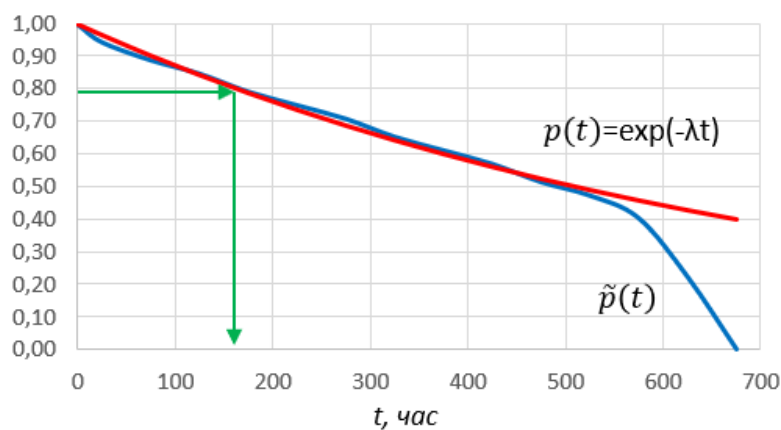


Рисунок 1.14 - График зависимости статистической оценки для вероятности безотказной работы от времени



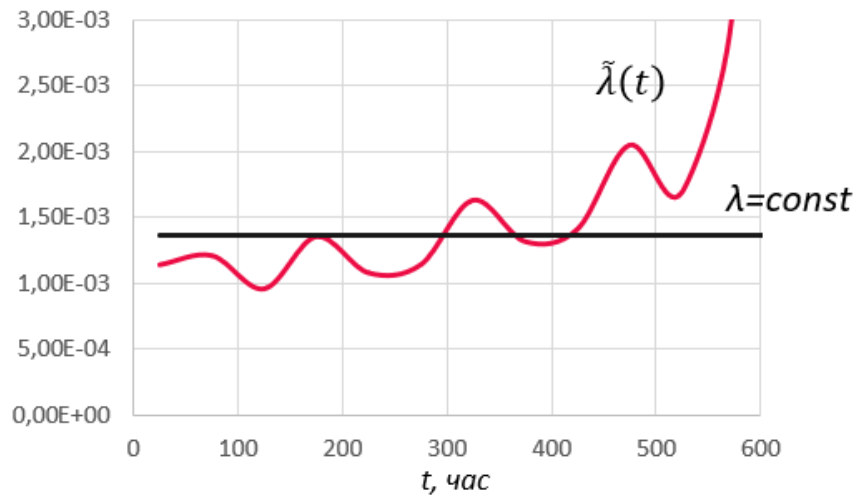


Рисунок 1.15 - График зависимости статистической оценки интенсивности отказов от времени

### Пример 1.4

#### Дано:

1. Нарботка до отказа изделия подчиняется экспоненциальному закону распределения с интенсивностью отказов  $\lambda = 0,02 \text{ час}^{-1}$ .

#### Найти:

1. Вероятность безотказной работы изделия в течение 10 час. и 50 час.
2. Среднее время наработки изделия до отказа.
3. 90 % наработку изделия до отказа.

#### Решение:

$$1. f(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

$$2. p(t) = e^{-\lambda t};$$

$$p(10) = e^{-0,02 \cdot 10} = 0,8187;$$

$$p(50) = e^{-0,02 \cdot 50} = 0,3679.$$

$$3. \bar{T}_0 = \frac{1}{\lambda};$$

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ (час)}.$$

$$4. T_\gamma = -\frac{\ln(\gamma/100)}{\lambda};$$

$$T_{90\%} = -\frac{\ln\left(\frac{90}{100}\right)}{0,02} = 5,27 \text{ (час)}$$

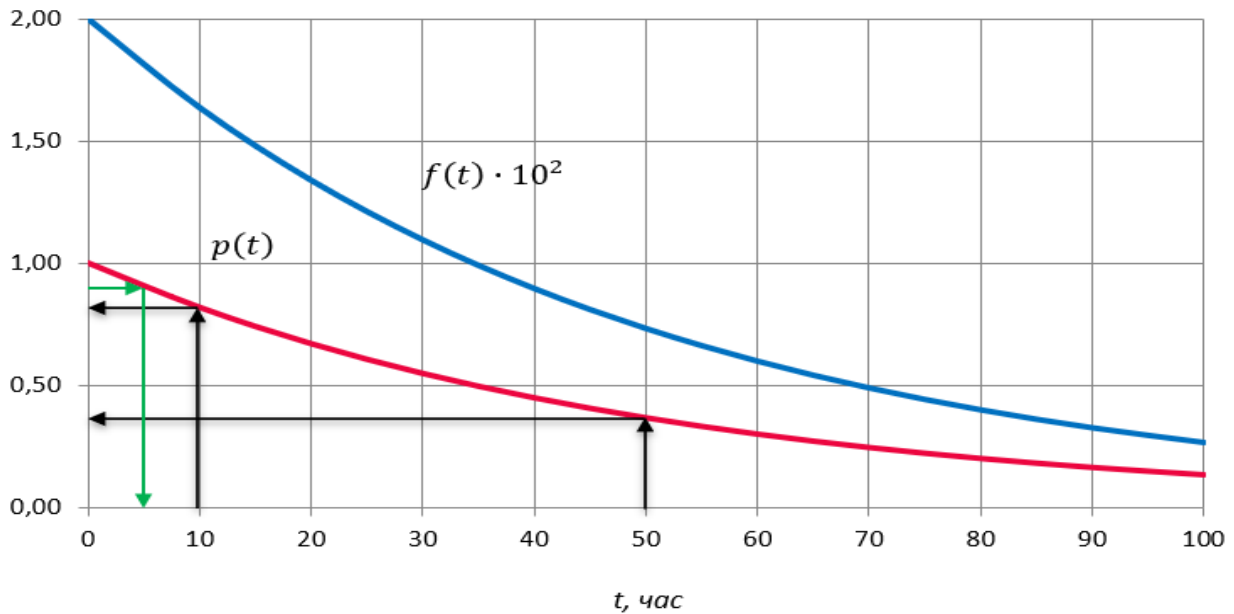


Рисунок 1.16 - График зависимости статистической оценки для вероятности безотказной работы и частоты отказов от времени

### 1.3.4 Нормальное распределение

Нормальное распределение или распределение Гаусса является наиболее универсальным, удобным и широко применяемым. Нормальное распределение случайной величины возникает всякий раз, когда случайная величина зависит от большого числа однородных по своему влиянию случайных факторов, причем влияние каждого из этих факторов по сравнению с совокупностью всех остальных незначительно. Это условие характерно для времени возникновения отказа, вызванного старением, т.е. этот закон используется для оценки надежности изделий при наличии постепенных (износных) отказов. Нормальный закон применяется также при малых разбросах значениях скорости изнашивания элементов и при симметричных законах распределения, когда можно подобрать преобразование, позволяющее перейти от этого закона к логарифмически нормальному распределению.

Для нормального закона распределения:

$$p(t) = 0,5 - \Phi(U); \quad (1.31)$$

$$q(t) = 0,5 + \Phi(U); \quad (1.32)$$

$$\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{u^2}{2}} dU; \quad (1.33)$$

$$U = \frac{t - M_t}{\sigma_t}; \quad (1.34)$$

$$f(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma_t}; \quad (1.35)$$

$$\varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2}}; \quad (1.36)$$

$$\lambda(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma_t} \cdot \frac{1}{0,5 - \Phi(U)}, \quad (1.37)$$

где  $\Phi(U)$  – нормированная функция Лапласа, обладающая – свойствами:

$$\Phi(0) = 0, \quad \Phi(U) = -\Phi(-U), \quad \Phi(\infty) = 0,5.$$

Монотонное возрастание интенсивности отказов с течением времени – характерный признак нормального распределения. Нормальное распределение существенно отличается от экспоненциального. Началом отсчета времени  $t$  служит начало эксплуатации объекта, т.е. момент, когда начинается процесс износа и старения, а началом отсчета – момент времени, когда установлено, что изделие исправно (этот момент может быть расположен в любой точке на оси времени).

При нормальном распределении наработка до отказа  $t$  как случайная величина должна принимать значения в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ , но так как наработка не может быть величиной отрицательной, то нормальный закон распределения в классическом виде не может быть применен. Распределение может быть лишь усеченным нормальным (рис. 1.16), для которого справедлива формула, показывающая связь между усеченной и обычной формой закона:

$$f_y(t) = Af(t),$$

$$\text{где } A = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_1, \\ \frac{1}{q(t_2) - q(t_1)}, & \text{при } t_1 \leq t < t_2, \\ 0, & \text{при } t \geq t_2 \end{cases} \text{ – нормирующий множитель;}$$

$t_1$  и  $t_2$  – границы интервала действия закона.

Так как для наработки справедливо  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = +\infty$ , в этом случае

$$f_y(t) = \frac{1}{1 - q(0)} f(t), \quad (1.38)$$

причем значение интегрального закона  $q(0)$  определяется для стандартной, а не для усеченной формы.

Принято также считать без серьезного ущерба для точности, что при отношении средней наработки к ее среднеквадратичному отклонению  $\frac{M_t}{\sigma_t} \geq 2,5$  нормирующий множитель  $A \approx 1$ .

Также можно использовать следующие соотношения:

$$f(t) = \frac{c}{\sigma_t^0 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-M_t^0)^2}{2(\sigma_t^0)^2}}$$

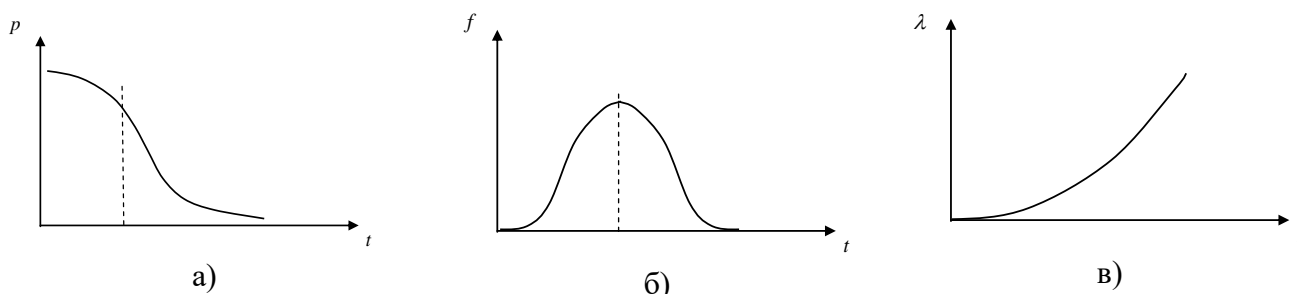


Рисунок 1.16 – Типичные зависимости характеристик надежности для усеченного нормального распределения

### Пример 1.5

#### Дано:

Время работы изделия подчинено нормальному закону распределения наработки до отказа с параметрами  $M_t = 80$  час. и  $\sigma_t = 20$  час.

#### Найти:

Количественные характеристики надежности  $p(t)$ ,  $f(t)$  и  $\lambda(t)$  для  $t=60$  час.

#### Решение:

Таблица 1.10 – Значения функции Лапласа

$U$	$\Phi(U)$	$U$	$\Phi(U)$	$U$	$\Phi(U)$	$U$	$\Phi(U)$
0,00	0,0000	0,32	0,1255	0,64	0,2389	0,96	0,3315
0,01	0,0040	0,33	0,1293	0,65	0,2422	0,97	0,3340
0,02	0,0080	0,34	0,1331	0,66	0,2454	0,98	0,3365
0,03	0,0120	0,35	0,1368	0,67	0,2486	0,99	0,3389
0,04	0,0160	0,36	0,1406	0,68	0,2517	<b>1,00</b>	<b>0,3413</b>
0,05	0,0199	0,37	0,1443	0,69	0,2549	1,01	0,3438

$$1. \quad \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{U^2}{2}} dU;$$

$$U = \frac{60 - 80}{20} = -1;$$

$$\Phi(-1) = -\Phi(1) = -0,3413.$$

$$2. p(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t-M_t}{\sigma_t}\right);$$

$$p(60) = 0,5 + 0,3413 = 0,8413.$$

$$3. f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-M_t)^2}{2\sigma_t^2}};$$

$$f(60) = \frac{1}{20\sqrt{2\pi}} e^{-0,5} = 0,0121 (\text{час}^{-1}).$$

$$4. \lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)};$$

$$\lambda(60) = \frac{0,0121}{0,8413} = 0,0144 (\text{час}^{-1}).$$

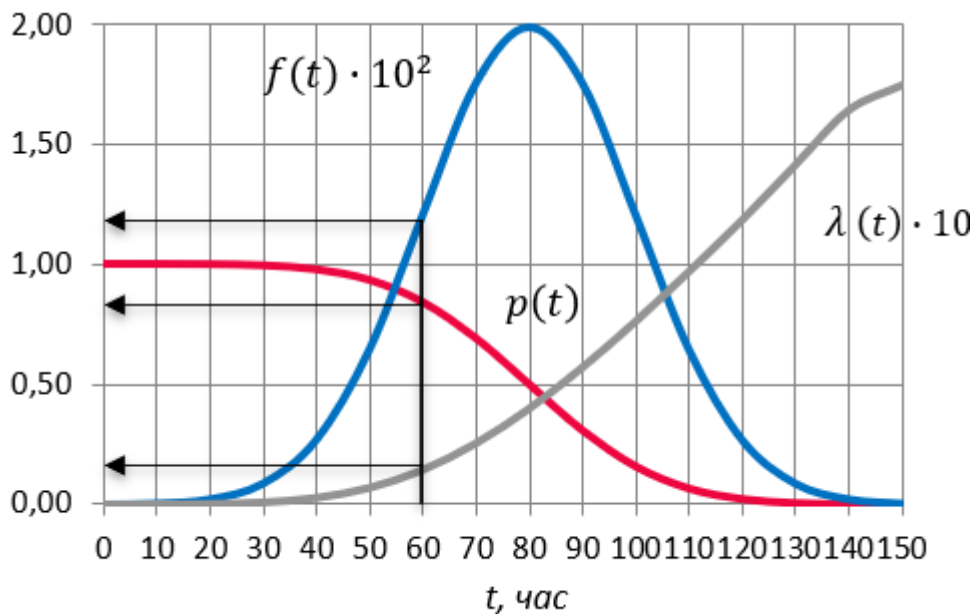


Рисунок 1.17 - График зависимости статистической оценки для вероятности безотказной работы, статистической оценки интенсивности отказов и частоты отказов от времени.

### 1.3.5 Гамма-распределение

Гамма-распределение является двух параметрическим распределением, и зависит от  $\lambda_0$  – параметра масштаба закона распределения и  $k$  – параметра формы закона распределения. Плотность вероятности отказа системы и определяются по формуле:

$$f(t) = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{\Gamma(k)} e^{-\lambda_0 t}, \quad (1.39)$$

где  $\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt$  – гамма-функция;

Гамма-функция обладает следующими свойствами:

- интеграл  $\int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt$  имеет конечную величину при  $k > 0$ ;
- $\Gamma(k+1) = k\Gamma(k)$ ;
- $\Gamma(k) = (k-1)!$ , при  $k \in N$ ;
- $\Gamma(k)\Gamma(1-k) = \frac{\pi}{\sin k\pi}$ ,  $k \notin Z$ ;  $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$ ;  $\Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$ .

Значения гамма-функции табулированы, а основные ее свойства изложены в [4].

При  $k < 1$  интенсивность отказов монотонно убывает (что соответствует периоду приработки системы и ее элементов), при  $k > 1$  – возрастает (что характерно для периода изнашивания и старения элементов). При  $k = 1$   $\gamma$ -распределение совпадает с экспоненциальным распределением, а при  $k > 10$   $\gamma$ -распределение приближается к нормальному закону. Если  $k$  принимает значения произвольных целых положительных чисел, то такое  $\gamma$ -распределение называют распределением Эрланга. Если  $\lambda = \frac{1}{2}$ , а значение  $k$  кратно  $\frac{1}{2}$ , то  $\gamma$ -распределение совпадает с распределением хи-квадрат. При увеличении  $k$   $\gamma$ -распределение будет приближаться к симметричному распределению, а интенсивность отказов будет иметь все более выраженный характер возрастающей функции времени (рис. 1.18).

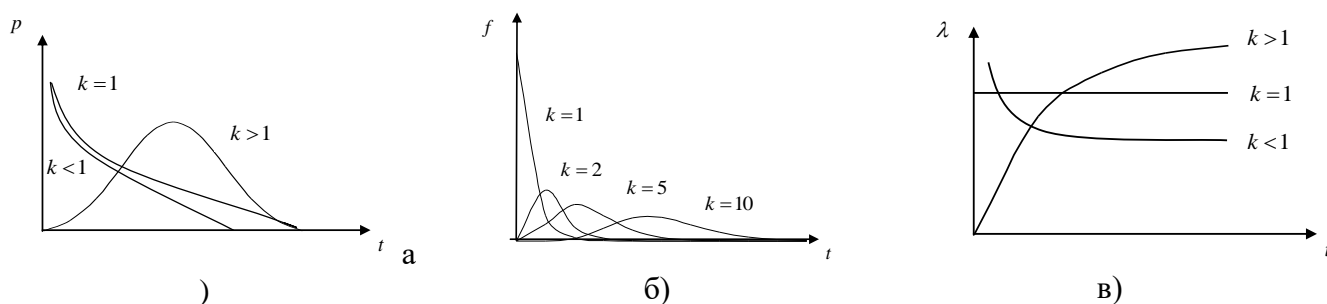


Рисунок 1.18 – Типичные зависимости характеристик надежности для  $\gamma$ -распределения

Гамма-распределение занимает важное место в теории надежности при описании систем с ненагруженным резервированием, состоящих из одинаковых элементов с экспоненциальными законами распределения. Если отказ системы возникает тогда, когда произойдет не менее  $k$  отказов его элементов, а отказы элементов подчинены экспоненциальному закону с параметрами  $\lambda_0$ , плотность вероятности отказа системы и определяются по формуле:

Гамма-распределение широко применяется при описании появления отказов стареющих элементов, времени восстановления, наработки на отказ резервированных систем.

Вероятность  $k$  и более отказов, т.е. вероятность отказа данной системы

$$p(n \geq k) = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} e^{-\lambda_0 t} \quad (1.40)$$

Среднее время наработки до отказа

$$M_t = k M_{ii} = \frac{k}{\lambda_0} \quad (1.41)$$

Интенсивность отказов системы

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{i!} (\lambda_0 t)^i} \quad (1.42)$$

Вероятность безотказной работы системы

$$p(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{i!} (\lambda_0 t)^i \quad (1.43)$$

### 1.3.6 Распределение Вейбулла

Закон Вейбулла представляет собой двухпараметрическое распределение. Этот закон является универсальным, так как при соответствующих значениях параметров превращается в нормальное, экспоненциальное и другие виды распределений (рис. 1.19).

Показатели надежности этого распределения определяются:

– плотность вероятности отказов

$$f(t) = \lambda_0 \alpha t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda_0 t^\alpha}; \quad (1.44)$$

– вероятность безотказной работы

$$p(t) = e^{-\lambda_0 t^\alpha}; \quad (1.45)$$

– интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1} \quad (1.46)$$

В выражениях (1.36) - (1.38)  $\alpha$  и  $\lambda_0$  – параметры закона распределения. Параметр  $\lambda_0$  определяет масштаб, при его изменении кривая распределения сжимается или растягивается. При  $\alpha=1$  функция распределения Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением; при  $\alpha < 1$  интенсивность отказов будет монотонно убывающей функцией; при  $\alpha > 1$  – монотонно возрастающей (см. рис. 1.19). Это обстоятельство дает возможность подбирать для опытных данных наиболее подходящие параметры  $\alpha$  и  $\lambda_0$ , с тем, чтобы уравнение функции распределения наилучшим образом совпадало с опытными данными.

Средняя наработка до первого отказа определится из следующего выражения:

$$M_t = \frac{1}{\alpha} \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{\lambda_0^{1/\alpha}}, \quad (1.47)$$

где  $\Gamma(k)$  – гамма-функция,  $k = \frac{1}{\alpha}$ .

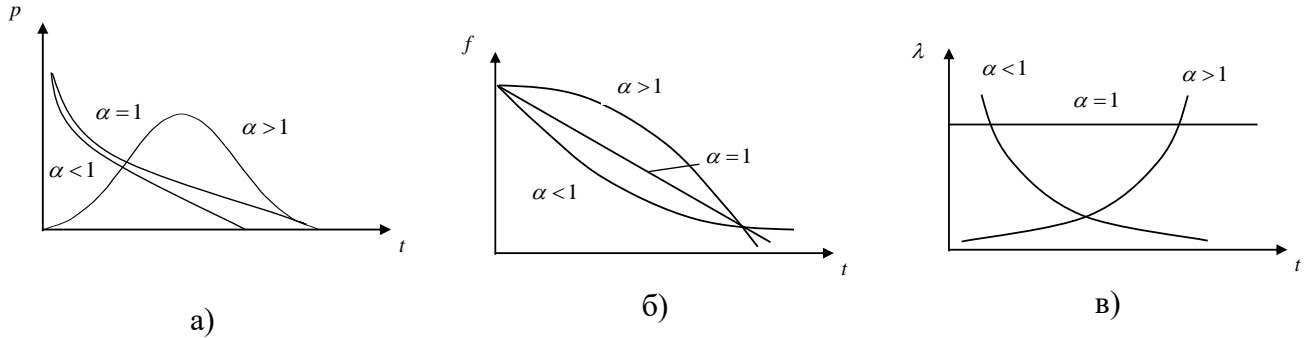


Рисунок 1.19 – Типичные зависимости характеристик надежности для распределения Вейбулла

### Пример 1.6

**Дано:**

Нарботка изделия до отказа подчинена закону распределения Вейбулла с параметрами  $\alpha = 3,0$  и  $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ час}^{-3}$ .

**Найти:**

Количественные характеристики надежности  $p(t)$ ,  $f(t)$  и  $\lambda(t)$  для  $t=50$  час. и  $M_t$ .

**Решение:**

Таблица 1.11 – Значения гамма-функции

$p$	$\Gamma(p)$	$p$	$\Gamma(p)$	$p$	$\Gamma(p)$	$p$	$\Gamma(p)$	$p$	$\Gamma(p)$
1,00	1,0000	1,20	0,9182	1,40	0,8873	1,60	0,8935	1,80	0,9314
1,13	0,9399	<b>1,33</b>	<b>0,8934</b>	1,53	0,8876	1,73	0,9147	1,93	0,9724
1,19	0,9209	1,39	0,8879	1,59	0,8924	1,79	0,9288	1,99	0,9959

$$1. p(t) = e^{-\lambda_0 t^\alpha};$$

$$p(50) = e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 150^3} = 0,7788.$$



$$2. f(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda_0 t^\alpha};$$

$$f(50) = 3,0 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 150^{(3-1)} \cdot e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 150^{3,0}} = 0,0117 (\text{час}^{-1}).$$

$$3. \lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)};$$

$$\lambda(50) = \frac{0,0121}{0,8413} = 0,0150 (\text{час}^{-1}).$$

$$4. M_t = \frac{\Gamma(1+\frac{1}{\alpha})}{\lambda_0^{1/\alpha}};$$

$$M_t = \frac{\Gamma(1+\frac{1}{3})}{(2 \cdot 10^{-6})^{1/3}} = 70,91 (\text{час})$$

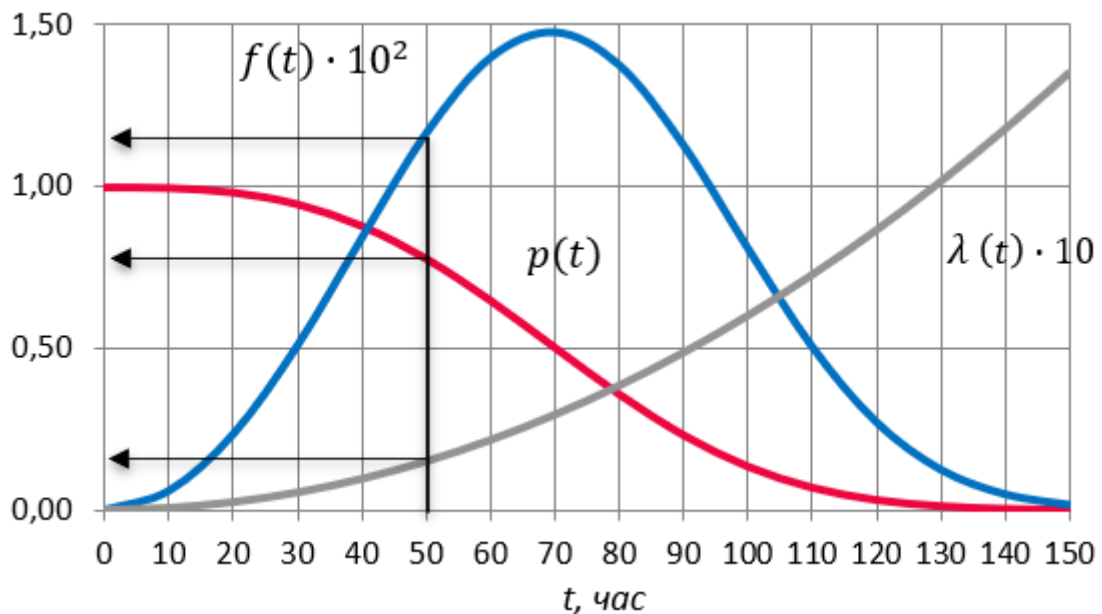


Рисунок 1.20 - График зависимости статистической оценки для вероятности безотказной работы, статистической оценки интенсивности отказов и частоты отказов от времени

### 1.3.7 Распределение Рэлея

Впервые оно было введено лордом Релеем в 1880 году при рассмотрении огибающей суммы большого числа гармонических колебаний различных частот. В дальнейшем выяснилось, что при пристрелке оружия, если разбросы

попаданий в каждом из двух взаимно перпендикулярных направлений независимы и имеют одинаковые нормальные распределения с параметрами.

Для закона распределения Релея (рис. 1.21):

$$f(t) = \frac{t}{\sigma_t^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}}; \quad (1.48)$$

$$p(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}}; \quad (1.49)$$

$$\lambda(t) = \frac{t}{\sigma_t^2}; \quad (1.50)$$

$$M_t = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad (1.51)$$

где  $\sigma_t$  – мода распределения случайной величины времени безотказной работы.

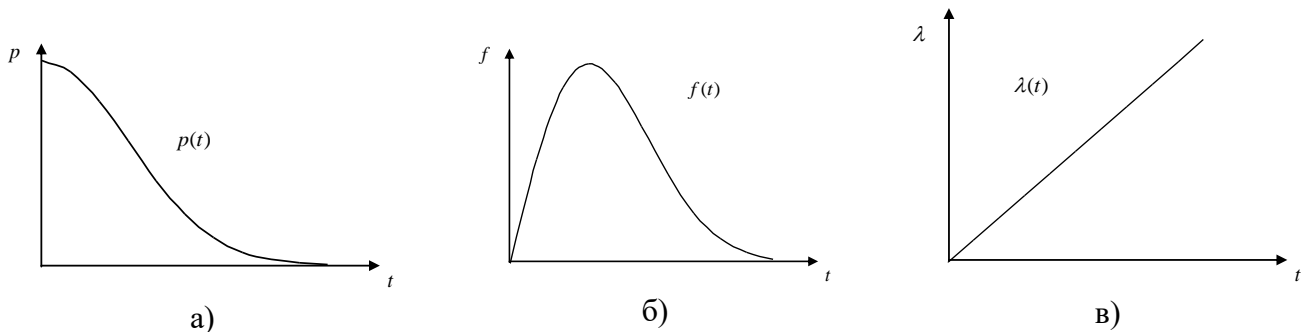


Рисунок 1.21 – Типичные зависимости характеристик надежности для распределения Релея

### 1.3.8 О выборе закона распределения

Кроме вышеперечисленных законов, используются также распределения Эрланга, Стьюдента, Лапласа и пр. Определение закона распределения отказов имеет большое значение при исследовании и оценке надежности. Определение  $p(t), f(t), \lambda(t)$  по одной и той же исходной информации, но при различных предположениях о законе распределения может привести к существенно отличающимся результатам. При выборе теоретического закона распределения необходимо учитывать информацию об изменениях, которые происходят в объектах перед наступлением отказов, т.е. о характере физических процессов, протекающих в объекте.

Закон распределения отказов можно определить по экспериментальным данным, но для этого необходимо проведение большого числа опытов в идентичных условиях. Практически эти условия, как правило, трудно обеспечить. Кроме того, такое решение содержит черты пассивной регистрации событий. Вместе с тем во многих случаях за время эксплуатации успевают отказать лишь незначительная доля первоначально имевшихся объектов. Полученным статистическим данным соответствует начальная (левая) часть экспериментального распределения. Более рационально – изучение условий,

физических процессов при которых возникает то или другое распределение. При этом составляются модели возникновения отказов и соответствующие им законы распределения времени до появления отказа, что позволяет делать обоснованные предположения о законе распределения. Опытные данные должны служить средством проверки обоснованности прогноза, а не единственным источником данных о законе распределения. Такой подход необходим для оценки надежности новых изделий, для которых статистический материал весьма ограничен.

Экспоненциальный закон распределения характерен для внезапных отказов на интервале времени, когда период приработки объекта закончился, а период износа и старения еще не начался, т.е. для нормальных условий эксплуатации.

Нормальное распределение характерно для времени возникновения отказа, вызванного старением, этот закон используется для оценки надежности изделий при наличии постепенных (износных) отказов.

Гамма-распределение широко применяется при описании появления отказов стареющих элементов, времени восстановления, наработки на отказ резервированных систем.

Распределение Вейбулла имеет место для отказов, возникающих по причине усталости тела детали или поверхностных слоев (подшипники, зубчатые передачи, развитие усталостной трещины в зоне местной концентрации напряжений, технологического дефекта или начального повреждения), а также отказов в процессе приработки.

Распределение Рэлея достаточно полно описывает поведение ряда объектов и элементов радиоэлектроники с явно выраженным эффектом старения и износа.

Для выбора закона распределения достаточно удобным является определение коэффициентов асимметрии и эксцесса с дальнейшим выдвигание и проверкой гипотезы о виде распределения.

Задача проверки гипотезы о законах распределения по коэффициентам асимметрии и эксцесса начинается с выбора нулевой гипотезы  $H_0$ . По данным эксперимента определяют статистические оценки коэффициента асимметрии  $a_x$  – величина, характеризующая асимметрию распределения случайной величины, и коэффициента эксцесса  $e_x$  – мера остроты пика распределения случайной величины:

$$a_x = \frac{\mu_3(x)}{\sigma_x^3} ; \quad (1.52)$$

$$e_x = \frac{\mu_4(x)}{\sigma_x^4} - 3 , \quad (1.53)$$

где  $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$  – среднее квадратическое отклонение;

$\bar{x}$  – среднее значение;

$\mu_3(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3$  – третий центральный момент;

$\mu_4(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4$  – четвертый центральный момент.

Каждому закону распределений свойственно свое соотношение между коэффициентом асимметрии и коэффициентом эксцесса, которое может быть представлено диаграммой (рис. 1.22) с характерными областями и точками [8]. Например, точка (0;1,8) соответствует равномерному распределению, точка (0;3,0) – нормальному, прямая 1 – логарифмически нормальному распределению, прямая 2 – закону Стьюдента, прямая 3 – гамма-распределению, области 1, 2, 3 соответствующему бета-распределению. Знание значений  $a_x$  и  $e_x$  позволяет приблизительно определить закон распределения, который следует выдвинуть в качестве гипотезы  $H_0$ . При попадании точки в области диаграммы, для которых не определен закон распределения, выдвижение гипотетического закона должно осуществляться на основании дополнительных априорных соображений.

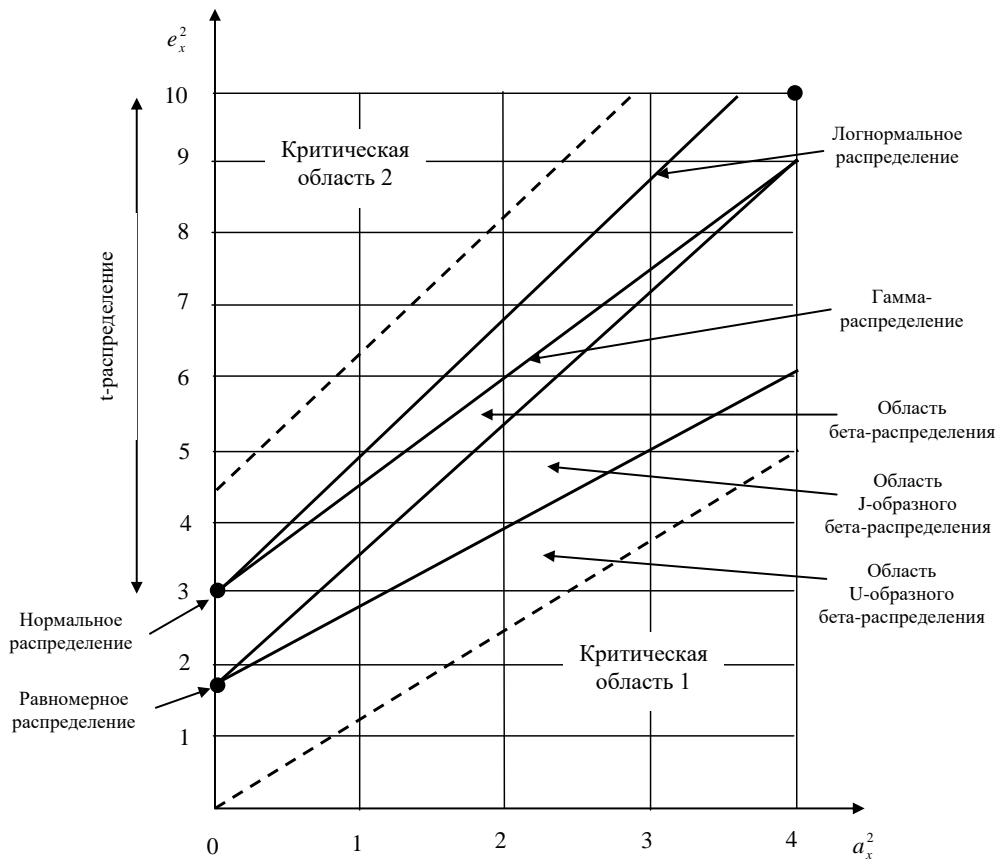


Рисунок 1.22 - Диаграмма соотношения коэффициентов асимметрии и эксцесса

Проверка гипотезы о законе распределения может быть произведена по критерию согласия Колмогорова-Смирнова

$$D_n = \max_x |F(x) - F_{\text{mod}}(x)| \quad (1.54)$$

где  $F(x)$  и  $F_{\text{mod}}(x)$  соответственно статистическая (эмпирическая) и гипотетическая (теоретическая) функции распределения случайной величины  $x$ .

В качестве  $\psi_{\text{кр}}$  пользуются функцией вида

$$\psi_{\text{кр}} = \sqrt{n}D_n, \quad (1.55)$$

если

$$\psi_{\text{кр}} = \sqrt{n}D_n < \psi_{\text{кр},\alpha}, \quad (1.56)$$

где  $\psi_{\text{кр},\alpha}$  табулированное значение при заданной доверительной вероятности  $\alpha$  (находится с помощью таблицы функции Колмогорова-Смирнова), то гипотеза  $H_0$  о согласии эмпирического распределения и теоретического принимается.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие законы распределения случайных величин вы знаете?
2. Какими параметрами характеризуется нормальный закон?
3. Что такое плотность распределения?
4. Перечислите основные законы распределения наработки до отказа.
5. Что такое «надежность» технической системы?
6. Что такое «безотказность» технической системы?
7. Что такое «долговечность» технической системы?
8. Что такое «работоспособность» технической системы?
9. Что такое «неисправность» технической системы?
10. Что такое «предельное состояние» технической системы?
11. Что такое «повреждение» технической системы?
12. Что такое «отказ» технической системы?

### Список литературных источников для самостоятельного изучения

1. Половко А.М., Гуров С.В.: Основы теории надежности. - 2 изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
2. Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
3. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 234 с.
4. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984. – 318 с.

## 2 МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

### 2.1 Основные процедуры и методы анализа надежности

#### 2.1.1 Основные процедуры анализа надежности

Основные процедуры анализа надежности будут рассмотрены на основе [25, 27]. Обобщенная схема алгоритма анализа надежности представлена на рис. 2.1.

**Определение** исследуемой *системы* включает получение и анализ информации о системе, условиях ее эксплуатации и других факторах, определяющих ее надежность:

- 1) назначение, области применения и функции системы;
- 2) связи (функциональные, структурные, информационные и пр.) с надсистемой (системой высшего уровня);
- 3) связи (функциональные, структурные, информационные и пр.) с взаимодействующими системами в составе надсистемы;
- 4) структура системы, состав, взаимодействие и уровни нагруженности входящих в нее элементов, возможность перестройки структуры и (или) алгоритмов функционирования системы при отказах отдельных ее элементов;
- 5) наличие, виды и способы резервирования, используемые в системе;
- 6) типовая модель эксплуатации системы, устанавливающая перечень возможных режимов эксплуатации и выполняемых при этом функций, правила и частоту чередования режимов, продолжительность пребывания системы в каждом режиме и соответствующие наработки, номенклатуру и параметры нагрузок и внешних воздействий на систему в каждом режиме;
- 7) система ТО и ремонта, характеризующая видами, периодичностью, организационными уровнями, способами выполнения, техническим оснащением и материально-техническим обеспечением работ по ее ТО и ремонту;
- 8) распределение функций между операторами и средствами автоматического диагностирования (контроля) и управления системой, виды и характеристики человеко-машинных интерфейсов, определяющих показатели надежности работы операторов;
- 9) уровень квалификации персонала;
- 10) качество программных средств, применяемых в системе;
- 11) технология и организация производства при изготовлении системы и т.д.

**Определение требований (целей) надежности** включает анализ требований к надежности, а также характеристик и особенностей системы, режимов ее эксплуатации, условий окружающей среды и требований ТО и пр. Определение отказа системы, критериев отказов и условий, основанных на функциональной спецификации системы, ожидаемой продолжительности и

условий эксплуатации. При определении требований и целей надежности следует руководствоваться [24].



Рисунок 2.1 – Схема алгоритма анализа надежности

На ранней стадии разработки системы анализ надежности включает *распределение требований надежности* по ее элементам.

Определение требований надежности для подсистем является существенной частью проектирования системы. Цель распределения надежности – найти наиболее эффективную архитектуру системы, соответствующую требованиям надежности (технико-экономической

целесообразности). Распределение требований необходимо проводить для каждого показателя надежности.

Сначала необходимо распределить требования надежности системы по подсистемам. При этом должны быть учтены сложность подсистем и опыт эксплуатации аналогичных подсистем. Если на начальном этапе проекта требования не выполнены, распределение и (или) выполнение проекта необходимо повторить. Распределение требований надежности проводят с учетом анализа сложности, критичности, особенностей и условий эксплуатации системы.

Так как распределение требований надежности обычно проводят на раннем этапе проектирования, когда информация о системе отсутствует или ее очень мало, распределение необходимо периодически пересматривать.

Распределение требований по подсистемам и составным частям необходимо проводить на этапе эскизного проектирования. Это позволяет:

- проверить выполнение требований надежности для системы;
- установить в проекте выполнимые требования надежности для составных частей;
- установить четкие и поддающиеся проверке требования надежности.

Распределение требований надежности проводят в следующем порядке:

- анализируют систему и идентифицируют области, для которых информация о значениях характеристик надежности доступна или может быть легко оценена;
- определяют соответствующие величины и их вклад в требования надежности системы. Разность между требованиями и фактическим уровнем надежности является частью требований надежности, которая должна быть распределена между другими составными частями системы.

Преимущества распределения требований надежности заключаются в том, что оно:

- обеспечивает путь совершенствования продукции за счет понимания соотношения между целями надежности системы и ее элементами (подсистемами, блоками, компонентами);
- помогает оптимизировать надежность системы, поскольку рассматривает такие факторы как сложность, критичность, влияние условий эксплуатации.

Для распределения надежности существуют ограничения:

- часто предполагается, что элементы системы независимы, то есть отказ одного элемента не влияет на работу других элементов. Так как это предположение часто не выполняется, оно часто выступает в качестве ограничения;
- распределение для систем с резервированием является более сложным. Для них рекомендуется использовать итеративные методы проверки выполнения целей надежности системы.

Полнота выполнения вышеперечисленных процедур определяет выбор



соответствующего метода анализа, обеспечивающего приемлемую точность и достоверность при отсутствии или невозможности необходимой информации.

Источниками информации для идентификации объекта служит конструкторская, технологическая, эксплуатационная и ремонтная документация на объект в целом, его составные части и комплектующие изделия в составе и комплектах, соответствующих данному этапу расчета надежности.

**Анализ надежности** системы в зависимости от конкретного этапа жизненного цикла производится с целью прогнозирования, повышения или обеспечения их надежности. Анализ надежности может включать как качественный анализ надежности системы, так и количественный:

**Качественный анализ** надежности, в общем случае, включает:

- анализ структуры системы;
- определение возможных отказов системы и ее элементов, их механизмов, причин и последствий;
- определение механизма деградации, который может привести к отказу системы;
- анализ развития отказа системы;
- анализ ремонтпригодности с учетом времени восстановления, метода изоляции и метода восстановления;
- определение адекватности методов диагностики неисправностей и отказов;
- анализ возможностей предотвращения неисправностей и отказов;
- определение стратегий ТО и ремонта.

**Количественный анализ** в основном направлен на определение значений показателей надежности системы. Для расчета надежности используются методы, основанные на вычислении показателей по справочным данным о надежности элементов системы, по данным о надежности объектов-аналогов, данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчета.

В общем случае количественный анализ надежности системы включает:

- разработку моделей надежности;
- определение необходимых данных для расчета надежности;
- определение числовых оценок показателей надежности;
- проведение необходимого анализа критичности и чувствительности.

Надежность системы рассчитывают на всех этапах жизненного цикла и соответствующих этим этапам видов работ, устанавливаемым в программе обеспечения надежности (ПОН) системы или в документах, ее заменяющими.

ПОН должна устанавливать цели расчета, применяемые при расчете нормативные документы и методики, сроки выполнения расчета и исполнителей, порядок оформления, представления и контроля результатов расчета.

Целями расчета надежности являются:

1) обоснование количественных требований по надежности к системе или ее составным частям;

2) проверка выполнимости установленных требований и (или) оценка вероятности достижения требуемого уровня надежности системы в установленные сроки и при выделенных ресурсах, обоснование необходимых корректировок установленных требований;

3) сравнительный анализ надежности вариантов схемно-конструктивного построения системы и обоснование выбора рационального варианта;

4) определение достигнутого (ожидаемого) уровня надежности системы и (или) ее составных частей, в том числе расчетное определение показателей надежности или параметров распределения характеристик надежности составных частей системы в качестве исходных данных для расчета надежности системы в целом;

5) обоснование и проверку эффективности предлагаемых (реализованных) мер по доработкам конструкции, технологии изготовления, системы технического обслуживания и ремонта системы, направленных на повышение ее надежности;

6) решение различных оптимизационных задач, в которых показатели надежности выступают в роли целевых функций, управляемых параметров или граничных условий, в том числе таких, как оптимизация структуры системы, распределение требований по надежности между показателями отдельных составляющих надежности (например, безотказности и ремонтпригодности), расчет комплектов ЗИП, оптимизация систем ТО и ремонта, обоснование гарантийных сроков и назначенных сроков службы (ресурса) системы и др.;

7) проверка соответствия ожидаемого (достигнутого) уровня надежности системы установленным требованиям (контроль надежности), если прямое экспериментальное подтверждение ее уровня надежности невозможно технически или нецелесообразно экономически.

В основах качественного и количественного анализа надежности лежит выбор метода(ов), адекватного(ых) особенностям системы, целям анализа, наличию необходимой информации о системе и исходных данных для их осуществления.

Адекватность выбранного метода и построенных моделей целям и задачам анализа надежности системы характеризуют:

– полнотой использования при анализе всей доступной информации о системе, условиях ее эксплуатации, системе ТО и ремонта, характеристиках надежности составных частей, свойствах применяемых в системе веществ и материалов;

– обоснованностью принятых при построении моделей допущений и предположений, их влиянием на точность и достоверность оценок показателей надежности;

– степенью соответствия уровня сложности и точности моделей надежности системы доступной точности исходных данных для анализа.

Степень адекватности моделей и методов расчета надежности оценивают путем:

- сопоставления результатов расчета и экспериментальной оценки показателей надежности систем-аналогов, для которых применялись аналогичные модели и методы расчета;
- исследования чувствительности моделей к возможным нарушениям принятых при их построении допущений и предположений, а также к погрешностям исходных данных для расчета;
- экспертизы и апробации применяемых моделей и методов, проводимых в установленном порядке.

Завершающая анализ надежности процедура разработки **выводов и рекомендаций** включает решение следующих задач:

- оценку повышения надежности системы по результатам проектирования и производства (например, резервирование, снижение нагрузок, совершенствование стратегий ТО системы, контроля продукции и технологических процессов, системы менеджмента качества и материально-технической базы производства);
- исследование системы и определение слабых мест и режимов критичности отказов компонентов;
- исследование проблем интерфейса системы, свойств и механизмов отказоустойчивости и т.д.;
- разработка альтернативных путей повышения надежности, например, использование резервирования, контроля эффективности, обнаружения неисправностей, методов реконфигурации системы, процедур технического обслуживания, заменяемых компонентов, процедур восстановления;
- выполнение исследований по оценке стоимости и сложности альтернативных проектов;
- оценка влияния возможностей производственного процесса;
- оценка результатов и сравнение их с требованиями.

### ***2.1.2 Классификация методов анализа надежности***

Методы анализа надежности можно разделить на 2 основные группы:

- основные методы анализа надежности;
- общие технические методы, которые могут быть использованы как вспомогательные при проведении анализа надежности, а также при проектировании надежности.

Методы анализа надежности, используемые для решения общих задач анализа надежности, приведены в табл. 2.1, детальные характеристики методов приведены в табл. 2.2.

Общие технические методы обычно включают:

- исследование ремонтпригодности;
- анализ паразитных контуров схемы;

- анализ наихудшего случая;
- имитационное моделирование отклонений;
- разработку программного обеспечения по надежности;
- анализ конечных элементов;
- ограничение допустимых значений и выбор частей;
- анализ Парето;
- диаграмму причин и следствий;
- анализ отчета об отказах и систему корректирующих действий.

Следующие методы не выделены как самостоятельные, так как они являются модификацией упомянутых в табл. 2.1 методов анализа надежности:

- анализ причин/следствий - комбинация ЕТА и FTA;
- динамический FTA-расширение FTA, когда некоторые события представляются при помощи марковских моделей;
- функциональный анализ отказов - специальный вид FMEA;
- двоичные диаграммы решений, используемые главным образом для эффективного построения дерева неисправностей.

Методы анализа надежности классифицируют в соответствии с их главной целью по следующим категориям:

1) Методы для предотвращения отказов и неисправностей, например:

- ограничение допустимых значений и выбор частей;
- анализ прочности - напряжений.

2) Методы анализа архитектуры системы и распределения надежности.

2а) Восходящие методы, главным образом направленные на исследования последствий единичных неисправностей:

- анализ дерева событий (ЕТА);
- анализ видов и последствий отказов (FMEA),
- исследование опасности и удобства использования (HAZOP).

Начальным этапом любого восходящего метода является идентификация режимов отказов на соответствующем уровне. Для каждого режима отказа определяют его влияние на эффективность системы. Восходящий метод анализа надежности позволяет четко идентифицировать все режимы одиночных отказов, поскольку он опирается на списки частей системы или другие контрольные списки. На начальных этапах разработки анализ может быть качественным и иметь дело с функциональными отказами. Затем может применяться количественный анализ.

2б) Нисходящие методы, исследующие последствия комбинаций неисправностей:

- анализ дерева неисправностей (FTA);
- Марковский анализ;
- анализ сети Петри;
- таблица истинности (анализ функциональной структуры);
- анализ структурной схемы надежности (RBD).

Таблица 2.1 – Использование методов для решения общих задач анализа надежности

Метод	Распределение требований/целей надежности	Качественный анализ	Количественный анализ	Рекомендации
Прогнозирование интенсивности отказов	Применим для последовательных систем без резервирования	Возможно применение для анализа стратегии технического обслуживания	Вычисление интенсивностей отказов и МТТФ* для электронных компонентов и оборудования	Поддержка
Анализ дерева неисправностей (отказов)	Применим, если поведение системы зависит от времени или последовательности событий	Анализ комбинации неисправностей	Вычисление показателей безотказности работоспособности и относительного вклада подсистем в системы	Применим
Анализ дерева событий	Возможен	Анализ последовательности отказов	Вычисление интенсивностей отказов системы	Применим
Анализ структурной схемы надежности	Применим для систем, у которых можно выделить независимые блоки	Анализ путей работоспособности	Вычисление показателей безотказности и комплексных показателей надежности системы	Применим
Марковский анализ	Применим	Анализ последовательности отказов	Вычисление показателей безотказности и комплексных показателей надежности системы	Применим
Анализ сети Петри	Применим	Анализ последовательности отказов	Подготовка описания системы для марковского анализа	Применим
Анализ режимов и последствий (критичности) отказов FME(C)A	Применим для систем, у которых преобладают единичные отказы	Анализ воздействия отказов	Вычисление интенсивностей отказов (и критичности) системы	Применим
Исследование HAZOP	Поддержка	Анализ причин и последствий отклонений	Не применим	Поддержка
Анализ человеческого фактора	Поддержка	Анализ воздействия действий эффективности человека на работу системы	Вычисление вероятностей ошибок человека	Поддержка
Анализ прочности и напряжений	Не применим	Применим как средство для предотвращения неисправности	Вычисление показателей безотказности для электромеханических компонентов	Поддержка
Таблица истинности (анализ функциональной структуры)	Не применим	Возможен	Вычисление показателей безотказности и комплексных показателей надежности системы	Поддержка
Статистические методы надежности	Возможен	Анализ воздействия неисправностей	Определение количественных оценок показателей безотказности с неопределенностью	Поддержка

\* МТТФ - средняя наработка до отказа.

**Примечание:** Слова-обозначения, принятые в таблице: «применим» - метод рекомендован для решения задачи; «возможен» - метод допускается использовать для решения задачи, учитывая, что он имеет некоторые недостатки по сравнению с другими методами; «поддержка» - метод применим для некоторой части задачи и может использоваться для решения всей задачи только в комбинации с другими методами; «не применим» - метод не допускается использовать для решения задач

Таблица 2.2 – Характеристики методов анализа надежности

Метод	Подходит для сложных систем	Подходит для новых проектов	Количественный анализ	Подходит для комбинаций неисправностей	Подходит для обработки с учетом последовательности и зависимости событий	Может использовать зависимые события	Восходящий или нисходящий	Подходит для распределения надежности	Квалификация исполнителя	Применимость и унифицированность	Потребность в инструментах поддержки	Проверка правдоподобия результатов	Пригодность Инструментальных средств	Обозначение стандарта
Прогнозирование интенсивности отказов	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Нет	BU	Да	Н	В	С	Да	В	[5]
Анализ дерева неисправностей (FTA)	Да	Да	Да	Да	Нет	Нет	TD	Да	С	В	С	Да	В	ГОСТ Р 51901.13
Анализ дерева событий (FTA)	NR	NR	Да	NR	Да	Да	BU	NR	В	С	С	Да	С	-
Анализ структурной схемы надежности (RBD)	NR	NR	Да	Да	Нет	Нет	TD	Да	Н	С	С	Да	С	ГОСТ Р 51901.14
Марковский анализ	Да	Да	Да	Да	Да	Да	TD	Да	В	С	В	Нет	С	ГОСТ Р 51901.15
Анализ сети Петри	Да	Да	Да	Да	Да	Да	TD	Да	В	Н	В	Нет	Н	-
Анализ видов и последствий отказов (FMEA)	NR	NR	Да	Нет	Нет	Нет	BU	NR	Н	В	Н	Да	В	ГОСТ 27.310
Исследование HAZOP	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	BU	Нет	Н	С	Н	Да	С	ГОСТ Р 51901.11
Анализ надежности человеческого фактора (HRA)	Да	Да	Да	Да	Да	Да	BU	Нет	В	В	С	Да	С	-
Анализ нагрузок и напряжений	NA	NA	Да	Na	NA	Нет	NA	Нет	В	С	В	Да	С	-
Таблица истинности	Нет	Да	Да	Да	Нет	Нет	NA	Да	В	С	В	Нет	Н	-
Статистические методы надежности	Да	Да	Да	Да	Да	Да	NA	NR	В	С	В	С	Н	[6]

**Примечание** - Обозначения, принятые в настоящей таблице:

NR - может использоваться для анализа простых систем. Не рекомендуется использовать как автономный метод (только совместно с другими методами);

TD - нисходящий метод анализа; BU - восходящий метод анализа; NA - критерий не применим для этого метода; В - высокий; С - средний; Н - низкий.

На начальном этапе нисходящего метода определяют одиночное неблагоприятное событие или событие, обеспечивающее функционирование (успех) системы на самом высоком уровне (вершина событий). Затем идентифицируют и анализируют причины этого события на всех уровнях. Нисходящий метод начинают с самого высокого уровня, то есть с анализа надежности в целом системы или подсистемы и последовательно спускаются на более низкий уровень. Затем анализ проводят на следующем более низком уровне системы, идентифицируют все отказы и соответствующие режимы последствий. Этот процесс продолжают до тех пор, пока не достигнут самого низкого уровня. Нисходящий метод используют для оценки многократных отказов, включая последовательные зависимые отказы, при наличии неисправностей общей причины, а также для сложных систем.

2в) Методы для оценки характеристик основных событий, например:

- прогнозирование интенсивности отказов;
- анализ надежности человеческого фактора (HRA);
- статистические методы надежности;
- программное обеспечение для проектирования надежности (SRE).

Эти методы анализа применимы как для оценки характеристик качества, так и для оценок количественных характеристик при прогнозировании поведения системы в эксплуатации. Достоверность результата зависит от точности и правильности данных об основных событиях.

Однако ни один метод анализа надежности не может быть использован для всестороннего анализа реально существующих систем (аппаратных средств и программного обеспечения, систем со сложной функциональной структурой, систем с различными технологиями ТО и ремонта и т.д.).

Эффективность ремонтируемой системы в большой степени зависит от ремонтпригодности системы, а также от стратегии и методов ТО и ремонта. При необходимости продолжительного функционирования системы эффективным мероприятием по обеспечению работоспособности системы является оценка влияния на надежность системы мероприятий по ее ТО и ремонту. Надежность является эффективным показателем функционирования в тех случаях, когда требуется обеспечение непрерывного функционирования системы.

Ремонт системы в процессе эксплуатации без прерывания ее функционирования обычно возможен только для системы с избыточной структурой. В этом случае возможность восстановления или замены увеличивает показатели безотказности системы. Обычно для оценки аспектов ТО и ремонта системы проводят специальный анализ.

Для проведения анализа надежности сложных или многофункциональных систем, как правило, необходимо применять несколько дополнительных методов анализа.

На практике использование комбинаций нисходящего и восходящего анализов является весьма эффективным и позволяет обеспечить полноту анализа.

### **2.1.3 Выбор метода анализа надежности**

Выбор метода анализа надежности является очень индивидуальным и осуществляется объединенными усилиями экспертов по надежности и эксплуатации системы. Выбор должен быть сделан на ранних этапах разработки ПОН и исследован на применимость.

При выборе конкретного метода или совокупности методов необходимо учитывать следующие особенности:

1) сложность системы. Сложные системы, например, включающие резервирование или другие особенности, обычно требуют более глубокого уровня анализа, чем простые системы;

2) новизна системы. Вновь разрабатываемая система требует более тщательного анализа, чем разработанная ранее;

3) качественный или количественный анализ. Действительно ли количественный анализ необходим?;

4) единичные или многократные неисправности. Существенно ли влияние комбинации неисправностей или ими можно пренебречь?;

5) поведение системы зависит от времени или последовательности событий. Имеет ли значение для анализа последовательность событий (например, система отказывает только в случае, если событию А предшествует событие В, но не наоборот) или поведение системы зависит от времени (например, ухудшение режимов работы после отказа или выполнения функции)?;

6) возможность использования метода для зависимых событий. Зависят ли характеристики отказа или восстановления отдельного элемента системы от состояния системы в целом?;

7) восходящий или нисходящий анализ. Обычно применение восходящих методов является более простым. Применение нисходящих методов требует осмысления и творческого подхода и имеет больше возможностей для ошибок;

8) распределение требований надежности. Может ли метод быть приспособлен к количественному распределению требований надежности?;

9) квалификация исполнителя. Какой требуется уровень образования или опыта для правильного применения метода;

10) применимость;

11) необходимость инструментальной поддержки. Нуждается ли метод в компьютерной поддержке или он может быть выполнен вручную?;

12) проверки правдоподобия. Можно ли проверить правдоподобие результатов вручную? Если нет, являются ли инструментальные средства доступными?;

13) работоспособность инструментальных средств. Действительно ли инструментальные средства доступны? Имеют ли эти инструментальные средства общий интерфейс с другими инструментальными средствами анализа, чтобы результаты могли многократно использоваться или передаваться?;

14) стандартизация. Существует ли стандарт, устанавливающий



требования к представлению его результатов?

## **2.2 Метод структурной схемы надежности систем**

### ***2.2.1 Особенности применения метода структурной схемы надежности***

Метод структурной схемы надежности применяется в аналитических методах исследования надежности и относится к нисходящему методу анализа (расчета) надежности. Применение данного метода, его пригодность (индивидуальная или в сочетании с другими методами) для оценки надежности (работоспособности) системы и ее составных частей должны исследоваться аналитиком до начала применения метода структурной схемы надежности. Перед применением данного метода необходимо учитывать необходимые для анализа данные, сложность анализа и другие факторы.

Основы применения метода структурной схемы надежности изложены в [28]. Наиболее полное использование метода структурной схемы надежности представлены в [12].

Структурная схема надежности является наглядным представлением надежности системы. Она показывает логическую связь элементов системы. Метод структурной схемы надежности предназначен для применения к системам без восстановления и системам, в которых порядок появления отказов не имеет значения. Для систем, порядок отказов в которых должен приниматься во внимание, или систем с восстановлением применяют другие методы моделирования надежности системы, например, Марковский анализ. Предполагается, что в любой момент времени элемент системы может находиться только в одном из двух возможных состояний: работоспособном или неработоспособном.

В символическом представлении не делают различий между открытой и замкнутой схемой или другими моделями отказов, но при определении количественной оценки эти различия необходимо указывать.

Основой для построения моделей надежности системы является модель, отражающая обеспечение работоспособности системы, а также ее отказ. При этом отказы системы должны быть определены и перечислены. Кроме того, необходимо учитывать:

- функции, выполняемые системой;
- параметры, определяющие надежность системы и допустимые границы изменения этих параметров;
- режимы эксплуатации системы и условия окружающей среды.

Перед построением структурной схемы надежности необходимо дать четкое определение отказа системы, так как работоспособность системы может зависеть от одного или нескольких отказов ее элементов. Для каждого определения отказа системы следующим шагом является деление системы на

логические блоки в соответствии с целями анализа надежности. Отдельные логические блоки могут представлять собой подсистемы, каждая из которых, в свою очередь, может быть представлена своей структурной схемой надежности.

Количественный анализ структурной схемы (расчет) надежности проводят различными методами. В зависимости от типа структурной схемы могут использоваться простые Булевы методы и (или) анализ множества соединений и прерываний. Вычисления проводят на основе данных надежности основных компонент. Необходимо заметить, что структурная схема надежности системы необязательно отражает физические связи ее элементов.

Может оказаться возможным использование системы более чем для одного режима функционирования. Если для каждого режима используются отдельные системы, такие режимы должны обрабатываться независимо от остальных. При этом соответственно должны использоваться самостоятельные модели надежности. Если одна и та же система предназначена для выполнения всех функций, то для каждого типа операций должны использоваться отдельные структурные схемы надежности. Четкие требования надежности, связанные с каждым аспектом функционирования системы, являются необходимой предпосылкой составления структурной схемы надежности.

Необходимо учитывать условия окружающей среды, при которых система будет эксплуатироваться. При этом оценки надежности должны выполняться на основе одной и той же структурной схемы надежности, но с применением интенсивностей отказов, соответствующих конкретным условиям эксплуатации.

Должна быть установлена взаимосвязь между календарным временем работы и циклами процессов включения-выключения системы. Если процессы включения и выключения оборудования не вызывают отказ системы, а интенсивность отказов оборудования при хранении незначительна, то необходимо рассматривать только фактическое время работы элементов системы.

В некоторых случаях процессы включения и выключения являются главной причиной отказов элементов. Кроме того, элементы системы могут иметь более высокую интенсивность отказов при хранении, чем при функционировании (применении по назначению). В сложных случаях, когда включаются и выключаются только части системы, допускаются другие методы (например, Марковский анализ).

### ***2.2.2 Модели надежности системы***

При разработке модели надежности системы сначала необходимо дать определение работоспособного состояния системы. Если возможно более одного определения, то для каждого определения необходимо разработать отдельную структурную схему надежности. Затем необходимо разделить систему на блоки так, чтобы определить логику их взаимодействия в системе. При этом каждый блок должен быть статистически независимым и

максимально большим. В то же время каждый блок не должен содержать (по возможности) резервирования. Для простоты оценки (расчета) надежности каждый блок должен содержать только такие элементы, которые соответствуют одному и тому же статистическому распределению наработок до отказа.

**2.2.2.1 Последовательная структурная схема надежности.** Если для функционирования системы требуется, чтобы функционировали все блоки, то соответствующей структурной схемой является такая схема, в которой все блоки соединены последовательно, как показано на рис. 2.2.

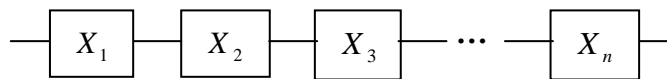


Рисунок 2.2 – Последовательная структурная схема надежности

Структурные схемы этого типа называются последовательными структурными схемами надежности.

**2.2.2.2 Параллельная структурная схема надежности.** Другой тип структурной схемы применяют в случае, когда отказ одного компонента или блока не влияет на работоспособность системы в соответствии с определением отказа системы. Данный тип схемы называется параллельным и отражает резервирование элементов системы (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Параллельная структурная схема надежности с нагруженным резервом (а) и ненагруженным резервом (б)

**2.2.2.3 Параллельно-последовательная и последовательно-параллельная структурные схемы надежности.** Если вся цепочка элементов системы дублирована, то структурная схема имеет вид, показанный на рис 2.4.

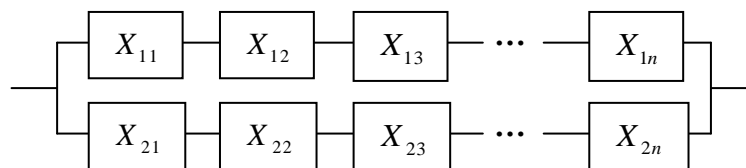


Рисунок 2.4 – Параллельно-последовательная структурная схема надежности (нагруженный резерв)

Если дублирован каждый блок в цепочке, структурная схема имеет вид, показанный на рис. 2.5.

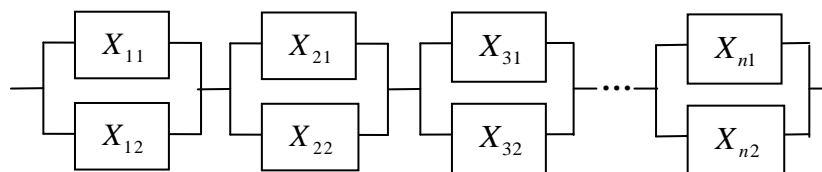


Рисунок 2.5 – Последовательно-параллельная структурная схема надежности (нагруженный резерв)

Структурные схемы этого типа называются параллельно-последовательная и последовательно-параллельная структурными схемами надежности.

#### 2.2.2.4 Комбинированная структурная схема надежности.

Структурные схемы, используемые для описания надежности системы, часто являются комбинацией последовательных и параллельных соединений. На рис. 2.6 представлены примеры данных схем.

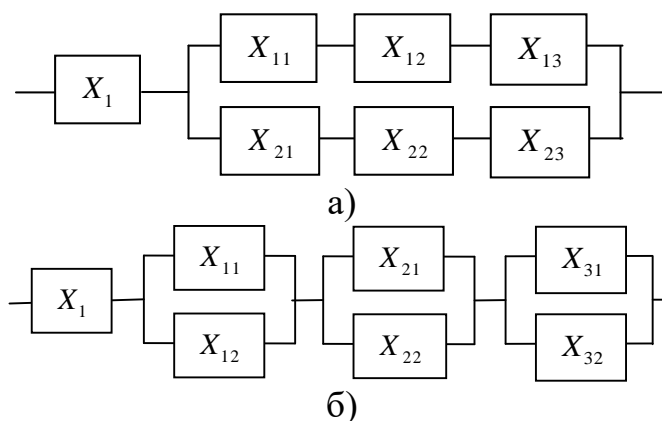


Рисунок 2.6 – Комбинированные структурные схемы надежности

Из-за статистической независимости отказ любого блока не должен повышать вероятность отказа любого другого блока системы.

**2.2.2.5 Структурная схема надежности с мажоритарным резервированием.** На практике встречаются системы, для работы которой необходимо функционирование  $m$  из  $n$  элементов, соединенных параллельно (см. рис. 1.6). Структурная схема такой системы имеет вид, показанный на рисунке 2.7.

Таким образом, структурная схема, изображенная на рисунке 2.7, для работы системы допускает отказ не более одного элемента.

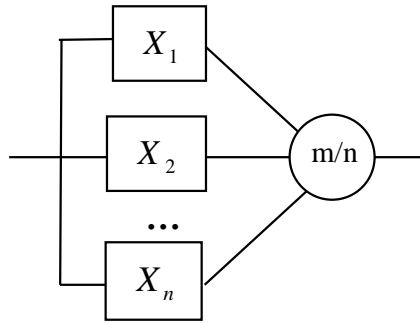


Рисунок 2.7 – Структурная схема надежности с мажоритарным резервированием

### 2.2.2.6 Структурная схема надежности сложной системы.

Большинство структурных схем надежности легко понятны, а требования к работе системы – очевидны. Однако не все структурные схемы являются комбинациями последовательных или параллельных систем.

Пример такой структурной схемы представлен на рис. 2.8.

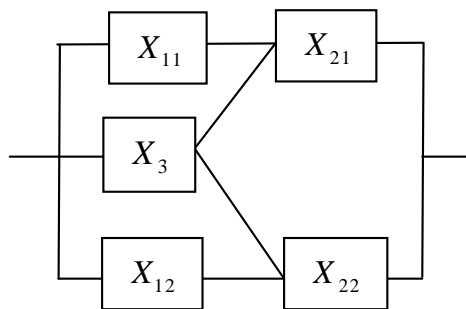


Рисунок 2.8 – Структурная схема надежности сложной системы

Представленная структурная схема достаточно простая. Система находится в рабочем состоянии, если одновременно работают элементы  $X_{11}$  и  $X_{21}$ , или  $X_3$  и  $X_{21}$ , или  $X_3$  и  $X_{22}$ , или  $X_{12}$  и  $X_{21}$ . Работы элементов  $X_{11}$  и  $X_{22}$  или  $X_{12}$  и  $X_{21}$  недостаточно для работы системы.

Иногда структурные схемы выглядят очень сложными. Но исследование позволяет сгруппировать элементы в блоки; которые должны быть статистически независимыми. Это означает, что никакие два (или более) блока не должны содержать элементов с одинаковым обозначением. Пример подобной структурной схемы изображен на рис 2.10.



Рисунок 2.9 – Редуцированная структурная схема надежности сложной системы

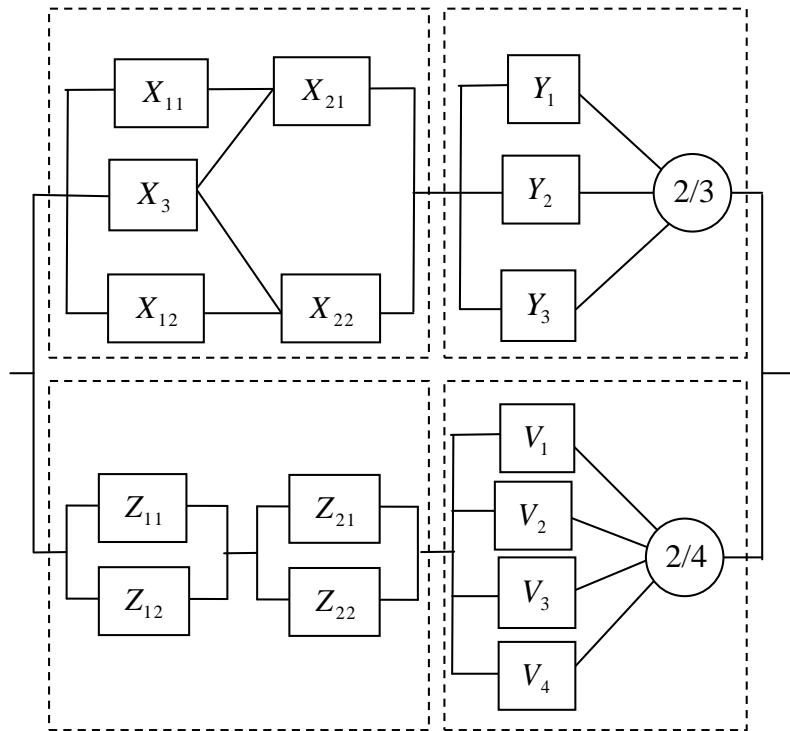


Рисунок 2.10 – Поблочная структурная схема надежности сложной системы

### 2.2.3 Расчет надежности системы

Основной целью расчета надежности системы является определение значений ее показателей, к которым следует отнести:

$P_C(t)$  - вероятность безотказной работы системы;

$\lambda(t)$  - интенсивность отказов системы;

$M_{tc}$  - среднее время безотказной работы системы.

Рассчитать надежность системы — это значит, по заданным количественным характеристикам надежности элементов определить количественные характеристики надежности системы.

**2.2.3.1 Последовательное соединение элементов в систему.** При последовательном соединении элементов в систему структурная схема надежности имеет вид, представленный на рис. 2.2.

При этом ВБР системы определится по выражению

$$P_C(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (2.1)$$

где  $P_i(t)$  - ВБР  $i$ -го элемента системы.

Если интенсивность отказов  $i$ -го элемента  $\lambda_i(t) = \lambda_i = const$ , то

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}; \quad (2.2)$$

$$P_C(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}; \quad (2.3)$$

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i ; \quad (2.4)$$

$$M_{t_c} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} . \quad (2.5)$$

### Пример 2.1

Дано: Система состоит из трех элементов, структурная схема надежности которой изображена на рисунке 2.11. Интенсивности отказов элементов системы имеют следующие значения:  $\lambda_1=2 \cdot 10^{-6}$  час $^{-1}$ ,  $\lambda_2=3 \cdot 10^{-6}$  час $^{-1}$ ,  $\lambda_3=5 \cdot 10^{-6}$  час $^{-1}$ .

Найти: Вероятность безотказной работы системы в течение 1 года (8760 часов).

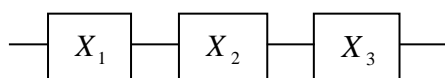


Рисунок 2.11 – Структурная схема надежности

Решение:

$$P_1(8760) = e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} = 0,9826;$$

$$P_2(8760) = e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} = 0,9741;$$

$$P_3(8760) = e^{-5 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} = 0,9571;$$

$$P_C(8760) = 0,9826 \cdot 0,9741 \cdot 0,9571 = 0,9161;$$

$$\lambda_c = (2 + 3 + 5) \cdot 10^{-6} = 10^{-5} \text{ (час}^{-1}\text{)};$$

$$P_C(8760) = e^{-10^{-5} \cdot 8760} = 0,9161.$$

**2.2.3.2 Параллельное соединение элементов в систему.** При параллельном соединении элементов в систему структурная схема надежности имеет вид, представленный на рис. 2.3а (нагруженный резерв).

Для режима нагруженного (горячего) резерва все элементы задействованы в работе и ВБР системы будет определяться по выражению

$$P_C(t) = 1 - Q_C(t) = 1 - Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot \dots \cdot Q_n(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) , \quad (2.6)$$

где  $Q_i(t) = 1 - P_i(t)$  - вероятность отказа  $i$ -го элемента системы.

Тогда

$$P_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)) \quad (2.7)$$

Если интенсивность отказов  $i$ -го элемента  $\lambda_i(t) = \lambda_i = const = \lambda_0$ , то

$$P_C(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^n ; \quad (2.8)$$

$$\lambda_c = \frac{n \lambda_0 e^{-\lambda_0 t} (1 - e^{-\lambda_0 t})^{n-1}}{1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^n} ; \quad (2.9)$$

$$M_{t_c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \quad (2.10)$$

Для режима облегченного (теплого) резерва резервные элементы находятся в режиме недогрузки до момента их включения в работу. Пусть  $\lambda_1$  - интенсивность отказа резервного элемента в режиме недогрузки до момента их включения в работу, а  $\lambda_0$  - интенсивность отказа резервного элемента в состоянии работы. Тогда

$$P_C(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[ 1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^i \right], \quad (2.11)$$

где  $a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left( j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right),$

$$M_{t_c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + ik}, \quad (2.12)$$

где  $k = \frac{\lambda_1}{\lambda_0},$

$$\lambda_c = \lambda_0 \left[ 1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_0} e^{-\lambda_1 t} \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i}{(i-1)!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^{i-1}}{1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^i} \right] \quad (2.13)$$

Для режима ненагруженного (холодного) резерва (рис. 2б)

$$P_C(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}; \quad (2.14)$$

$$M_{t_c} = \frac{n}{\lambda_0}; \quad (2.15)$$

$$\lambda_c = \frac{\lambda_0^n t^{n-1}}{(n-1)! \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}} \quad (2.16)$$

### Пример 2.2

Дано: Система состоит из трех элементов, два из которых находятся на нагруженном резерве. Структурная схема надежности системы изображена на рисунке 2.12. Интенсивность отказов каждого из элементов  $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ .

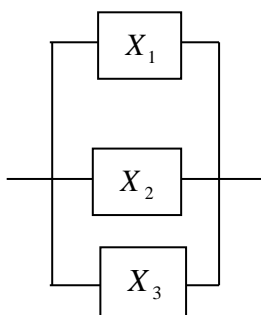


Рисунок 2.12 – Структурная схема надежности



Найти: Вероятность безотказной работы системы в течение 1 года (8760 часов), интенсивность отказов и среднюю наработку до отказа системы.

Решение:

$$P_c(8760) = 1 - (1 - e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 8760})^3 = 0,9554;$$

$$\lambda_c(8760) = \frac{3 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-5 \cdot 10^{-5}} \cdot 8760 (1 - e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 8760})^{3-1}}{1 - (1 - e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 8760})^3} = 2 \cdot 10^{-7} (\text{час}^{-1});$$

$$M_{tc} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-5}} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) = 36667 (\text{час}).$$

### Пример 2.3

Дано: Система состоит из двух элементов, один из которых находится в ненагруженном (теплом) резерве. Интенсивность отказа основного элемента  $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ , интенсивность отказа резервного элемента  $\lambda_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ час}^{-1}$ . Структурная схема надежности системы изображена на рисунке 2.13.

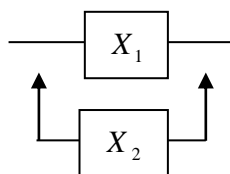


Рисунок 2.13 – Структурная схема надежности

Найти: Вероятность безотказной работы системы в течение 1 года (8760 часов), интенсивность отказов и среднюю наработку до отказа системы.

Решение:

$$a_1 = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-6}} = 10; \quad k = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-5}} = 0,1;$$

$$P_c(8760) = e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 8760} [1 + 10(1 - e^{-5 \cdot 10^{-6} \cdot 8760})] = 0,9219;$$

$$\lambda_c(8760) = 5 \cdot 10^{-5} [1 - 0,1 \cdot e^{-5 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} \frac{10}{1 + 10(1 - 0,1 \cdot e^{-5 \cdot 10^{-6} \cdot 8760})}] = 4,5 \cdot 10^{-5} (\text{час}^{-1});$$

$$M_{tc} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-5}} (1 + \frac{1}{1,1}) = 38182 (\text{час}).$$

### Пример 2.4

Дано: Система состоит из трех элементов, два из которых находятся в ненагруженном (холодном) резерве. Структурная схема надежности системы изображена на рисунке 2.14. Интенсивность отказа элементов  $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ .

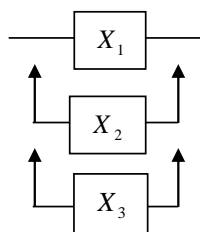


Рисунок 2.14 – Структурная схема надежности

**Найти:** Вероятность безотказной работы системы в течение 1 года (8760 часов), интенсивность отказов и среднюю наработку до отказа системы.

**Решение:**

$$P_C(8760) = e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 8760} \left( 1 + \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 8760}{1} + \frac{(5 \cdot 10^{-6} \cdot 8760)^2}{2} \right) = 0,9899;$$

$$\lambda_C(8760) = \frac{(5 \cdot 10^{-5})^3 \cdot 8760^2}{3!(1 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot 8760 + \frac{(5 \cdot 10^{-5} \cdot 8760)^2}{2})} = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ (час}^{-1}\text{)};$$

$$M_{tc} = \frac{3}{5 \cdot 10^{-5}} = 60000 \text{ (час)}.$$

**2.2.3.3 Мажоритарное резервирование системы.** Пример структурной схемы надежности для системы с мажоритарным резервированием представлен на рис. 2.7.

Определим количественные характеристики надежности при постоянно включенном резерве. Резервированная система состоит из  $n$  отдельных элементов. Для ее безотказной работы необходимо, чтобы работоспособными были не менее чем  $m$  элементов. Кратность резервирования такой системы равна  $k = \frac{n-m}{n}$ .

Если принять, что отказы отдельных элементов являются событиями независимыми, происходящими при одинаковых условиях работы, то применима частная теорема о повторении опытов, и вероятности гипотез подчинены биномиальному распределению.

$$P_C = \sum_{i=0}^{n-m} C_n^i P_0^{n-i} (1-P_0)^i \quad (2.17)$$

или

$$P_C(t) = \sum_{i=0}^{n-m} C_n^i P_0^{n-i}(t) \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j P_0^j(t), \quad (2.18)$$

где  $P_0(t) = e^{-\lambda_0 t}$ ;

$$M_{tc} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{n-m} \frac{1}{m+i}, \quad (2.19)$$

$$\lambda_c = \frac{\lambda_0 \sum_{i=0}^{n-m} C_n^i \sum_{j=0}^i (-1)^j C_1^j (n-i+j) e^{-\lambda_0(n-i+j)t}}{C_n^i \sum_{j=0}^i (-1)^j C_1^j e^{-\lambda_0(n-i+j)t}} \quad (2.20)$$

### Пример 2.5

Дано: Система построена по мажоритарному принципу «3 из 5». Элементы системы равнонадежны, а их интенсивность отказа  $\lambda_0=5 \cdot 10^{-5}$  час $^{-1}$ . Структурная схема надежности системы изображена на рисунке 2.15.

Найти: Вероятность безотказной работы системы в течение 1 года (8760 часов) и среднюю наработку до отказа системы.

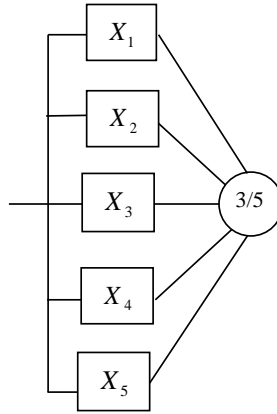


Рисунок 2.15 – Структурная схема надежности

Решение:

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}; \quad P_0(8760) = e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 8760} = 0,6453;$$

$$P_C = \sum_{i=3}^5 C_n^i P_0^i (1-P_0)^{n-i} = C_5^3 P_0^3 (1-P_0)^2 + C_5^4 P_0^4 (1-P_0)^1 + C_5^5 P_0^5 (1-P_0)^0 =$$

$$= 10P_0^3 (1-P_0)^2 + 5P_0^4 (1-P_0)^1 + P_0^5 = 6P_0^5 - 15P_0^4 + 10P_0^3;$$

$$P_C(8760) = 6 \cdot (0,6453)^5 - 15 \cdot (0,6453)^4 + 10 \cdot (0,6453)^3 = 0,7575;$$

$$M_{tc} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^2 \frac{1}{m+i} = \frac{1}{\lambda_0} \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \right) = \frac{47}{60 \cdot \lambda_0};$$

$$M_{tc} = \frac{47}{60 \cdot 5 \cdot 10^{-5}} = 15667 \text{ (час)}.$$

**Пример 2.6. Оценка надежности системы со сложным соединением элементов**

Дано: Система состоит из пяти элементов. Структурная схема надежности системы изображена на рисунке 2.16. Нарботка до отказов каждого из элементов подчиняется экспоненциальному закону распределения, а интенсивности отказов элементов системы имеют следующие значения  $\lambda_1=2 \cdot 10^{-6}$  час $^{-1}$ ,  $\lambda_2=3 \cdot 10^{-6}$  час $^{-1}$ ,  $\lambda_3=5 \cdot 10^{-6}$  час $^{-1}$ ,  $\lambda_{41}=\lambda_{42}=\lambda_4=7 \cdot 10^{-6}$  час $^{-1}$ .

Найти: Вероятность безотказной работы системы в течение 1 года (8760 часов) и среднее время наработки до отказа системы.

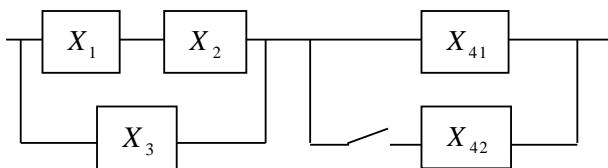


Рисунок 2.16 – Структурная схема надежности

Решение:

$$P_C(t) = p_{123}(t) \cdot p_4(t);$$

$$p_{123}(t) = 1 - (1 - p_{12}(t))(1 - p_3(t));$$

$$p_{12}(t) = p_1(t)p_2(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t};$$

$$p_4(t) = e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t);$$

$$P_C(t) = [1 - (1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t})(1 - e^{-\lambda_3 t})] \cdot e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t) =$$

$$= (e^{-(\lambda_3 + \lambda_4)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t})(1 + \lambda_4 t);$$

$$M_{tc} = \int_0^{\infty} P_C(t) dt = \frac{\lambda_3 + 2\lambda_4}{(\lambda_3 + \lambda_4)^2} + \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_4}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4)^2} - \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)^2};$$

$$P_C(8760) = 0,8860; \quad M_{tc} = 180844 \text{ (час)}.$$

### 2.3 Метод анализа прочности и напряжений

Анализ прочности и напряжений определяет способность компонента или элемента противостоять электрическим и механическим воздействиям окружающей среды или другим напряжениям, которые могут быть причиной отказа. Этот анализ определяет физические последствия воздействия на компоненты, а также механические или физические свойства компонента. Вероятность отказа компонента прямо пропорциональна прикладываемым напряжениям. Определенные отношения напряжений к прочности компонента определяют надежность компонента.

Анализ прочности и напряжений используют прежде всего при определении надежности или эквивалентной интенсивности отказов компонентов. Кроме того, его используют при исследовании физики отказа и определении вероятностного режима отказа компонента, вызванного определенной причиной. Структурная надежность компонента, то есть его способность выдерживать электрические или другие напряжения, зависит от его прочности или несущей способности. В этом случае надежность является вероятностной мерой эффективности компонента. Определение этой несущей способности включает неопределенность, поэтому ее выражают случайной

величиной; прикладываемое напряжение по этой же причине тоже представляют случайной величиной. Пересечение зон неопределенности этих случайных величин, представленных соответствующими распределениями, характеризует вероятность того, что напряжение превысит прочность, то есть вероятность появления отказа. Оценки напряжений, прочности и результирующая надежность частей определяются вторыми моментами и зависят от дисперсий случайных величин, характеризующих ожидаемые напряжения и прочность. Часто задача упрощается до сравнения одной переменной напряжения с соответствующей характеристикой прочности компонента. В общем случае прочность и напряжение должны быть описаны функцией эффективности или функцией состояния, которая представляет множество характеристик проекта. Положительное значение этой функции соответствует безопасному состоянию, а отрицательное - состоянию отказа. На рисунке 2.17 представлен пример графика распределения «нагрузки» и «прочности».

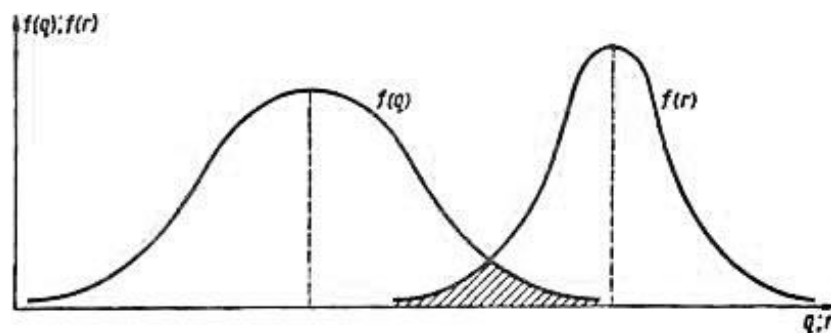


Рисунок 2.17 – График распределения «нагрузки» и «прочности»

Вероятность безотказной работы выражается уравнением:

$$p(r > q) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(r) \left[ \int_{-\infty}^r f(q) dq \right] dr, \quad (2.21)$$

а вероятность отказа:

$$p(r \leq q) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(q) \left[ \int_{-\infty}^q f(r) dr \right] dq. \quad (2.22)$$

Тогда:

$$p\{(r - q) > 0\} = p(\Delta > 0) = 0,5 + \Phi\left(\frac{M_{\Delta}}{\sigma_{\Delta}}\right); \quad (2.23)$$

$$M_{\Delta} = M_r - M_q; \quad (2.24)$$

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_q^2}; \quad (2.25)$$

$$v_r = \frac{\sigma_r}{M_r}, \quad v_q = \frac{\sigma_q}{M_q}, \quad k = \frac{M_r}{M_q}, \quad \frac{M_{\Delta}}{\sigma_{\Delta}} = \frac{k-1}{\sqrt{k^2 v_r^2 + v_q^2}}. \quad (2.26)$$

Ключевые элементы включают детальное знание составляющих материалов компонента и конструкции, а также других исследуемых свойств и соответствующих методов моделирования ожидаемых напряжений.

Анализ прочности и напряжений позволяет получить точное представление о надежности компонента, как функции процессов, приводящих к отказу. Метод позволяет учесть изменения проекта, а также изменчивости прикладываемых напряжений и их взаимную корреляцию. В результате метод обеспечивает более глубокое понимание воздействий сложных напряжений и лучше отображает физику отказа компонента, поскольку позволяет учесть воздействие различных факторов (механических, условий окружающей среды), включая их взаимодействие.

В случае сложных напряжений и особенно, когда имеется взаимодействие или корреляция между ними, решение задачи может быть очень сложным, требующим применения специальных программных средств. Другим недостатком анализа являются возможные ошибки в предположениях о распределениях случайных величин, которые могут привести к ошибкам при решении задачи.

**Пример 2.7.**

Дано: Металлический стержень Ст.3 ( $[\sigma]=230\pm 20$  МПа) прямоугольного сечения ( $a=3,0\pm 0,1$  мм и  $b=6,0\pm 0,1$  мм) подвергается растяжению силой

$$F=4000\pm 100 \text{ Н } (\sigma = \frac{F}{S} < [\sigma]).$$

Найти: Вероятность безотказной работы стержня.

Решение:

$$M_{[\sigma]} = 230 \text{ МПа};$$

$$M_a = 0,003 \text{ м};$$

$$M_b = 0,006 \text{ м};$$

$$M_\sigma = \frac{M_F}{M_a M_b} \quad M_\sigma = \frac{4000}{0,003 \cdot 0,006} = 222 \text{ (МПа)};$$

$$\sigma_{[\sigma]} = \frac{20}{2,58} = 7,75 \text{ (МПа)};$$

$$\sigma_{a(b)} = \frac{0,0001}{2,58} = 0,000039 \text{ (м)};$$

$$v_{[\sigma]} = \frac{7,75}{230} = 0,0337;$$

$$\sigma_F = \frac{100}{2,58} = 38,8 \text{ (Н)};$$

$$\sigma_{\sigma} = M_{\sigma} \sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{M_a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{M_b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_F}{M_F}\right)^2}$$

$$\sigma_{\sigma} = 222 \sqrt{\left(\frac{3,9 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{3,9 \cdot 10^{-5}}{6 \cdot 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{38,8}{4000}\right)^2} = 3,87 \text{ (МПа)} ;$$

$$\nu_{\sigma} = \frac{3,87}{222} = 0,0174 ;$$

$$k = \frac{M_{[\sigma]}}{M_{\sigma}} = 1,04 ;$$

$$p\{([\sigma] - \sigma) > 0\} = 0,5 + \Phi\left(\frac{k-1}{\sqrt{k^2 \nu_{[\sigma]}^2 + \nu_{\sigma}^2}}\right) \quad p\{([\sigma] - \sigma) > 0\} = 0,5 + \Phi\left(\frac{1,04-1}{\sqrt{(1,04 \cdot 0,0337)^2 + (0,0174)^2}}\right) =$$

$$= 0,5 + \Phi(0,9) = 0,5 + 0,3159 = 0,8159 .$$

## 2.4 Метод анализа дерева неисправностей (отказов)

### 2.4.1 Основные положения анализа дерева неисправностей (отказов)

Анализ дерева неисправностей (отказов) является нисходящим методом анализа надежности. Он предназначен для идентификации и анализа условий и факторов, которые вызывают или способствуют появлению события отказа (неисправности, наступления предельного состояния) и влияют на эффективность, безопасность, экономичность и другие характеристики системы.

Метод может использоваться для построения модели прогнозирования надежности, а также при проведении альтернативных исследований на стадии проектирования системы.

Данный метод применяют и для определения количественных оценок, характеризующих причины отказа или неисправности. Он позволяет учесть известные неблагоприятные воздействия и находить соответствующие режимы и причины отказов, способствует своевременному обнаружению потенциальных режимов отказов и повышению надежности системы на стадии проектирования.

Основы применения метода изложены в [28].

Метод основан на анализе событий и является методом моделирования надежности, учитывает сложные взаимодействия частей системы, моделируя их функциональные зависимости или зависимости отказов, события, вызывающие отказ, общие причины событий и позволяет сформировать общее представление о системе.

Для оценки показателей надежности системы с помощью данного метода достаточно широкое применение нашли логико-вероятностные методы (ЛВМ) и модели, которые успешно разрабатываются и применяются для выполнения

расчетов вероятностных показателей надежности, живучести, безопасности и риска функционирования различных систем большой размерности высокой структурной сложности [6, 13, 16.]. Основными исходными данными метода являются интенсивности отказов, интенсивности восстановления, вероятности появления режимов неисправностей для компонентов.

Анализ дерева неисправностей имеет двойное применение: как способ идентификации причины известного отказа и как метод анализа режима отказа, моделирования и прогнозирования надежности. Метод может использоваться для исследования потенциальных неисправностей, их режимов и причин для определения количественной оценки их вклада в отказ системы при проектировании. Дерево отказов (ДО) создают, чтобы представить не только функции системы, но также и ее аппаратные средства, программное обеспечение и их взаимодействие. Если человек является частью системы, человеческие ошибки могут быть включены в ДО. Вероятность появления причин режимов неисправностей определяют с помощью технического анализа и затем используют для оценки величины их вклада в состояние полной неработоспособности системы. При этом допускают возможность изменений и повышения надежности. Метод позволяет моделировать надежность комбинации аппаратных, электронных и механических средств и программного обеспечения, а также их взаимодействие.

Достоинствами данного метода являются:

- разработка модели надежности может быть начата на ранних стадиях проектирования и затем разрабатываться более подробно на стадии эксплуатации;
- обладает наглядностью и логичностью процедуры построения ДО, основанной на дедуктивном («сверху вниз») анализе причин отказов системы и ее составных частей с последовательным углублением внутрь структуры и отслеживанием условий возникновения отказов на каждом из уровней анализа;
- обладает возможностью удобной формализации учета влияния отказа элемента любого уровня детализации на работоспособность системы и учета влияния отказов элементов одной подсистемы на работоспособность другой (учет сложных причинно-следственных связей);
- построение ДО предполагает детальный анализ особенностей функционирования системы, исследование причин отказов производится прежде всего по функциональному признаку с позиций выполнения системой и подсистемами своих функций;
- анализ ДО легко поддается алгоритмизации и может быть реализован с помощью программных средств [11];
- возможностью определения наиболее «важных» отказов и наиболее слабых мест системы.

Однако необходимо отметить и ограничения данного метода:

- не позволяет представить события, зависящие от времени или последовательности их появления;



– имеет ограничения относительно реконфигурации системы и систем, функционирование которых зависит от их состояния.

Эти ограничения можно устранить, применяя метод в комбинации с марковскими моделями, если марковские модели применяются для основных событий дерева неисправностей.

#### **2.4.2 Правила и особенности реализации процедуры построения дерева неисправностей (отказов) системы**

Дерево отказов представляет собой графическое отображение причинно-следственных связей между наступлением отказа системы с отказами его элементов и другими событиями, влияющими на условия возникновения отказов. При построении дерева отказов используют логические элементы, приведенные в таблице 2.3. Пример дерева отказов приведен на рис. 2.18.

Таблица 2.3 – Логические элементы, используемые при построении дерева отказов

Категория логического элемента	Название и причинная взаимосвязь логического элемента	Графическое обозначение
Символы событий	Первичное - событие, расположенное в основании дерева неисправностей. Базисное - событие, которое не может (не будет) развиваться в дальнейшем	
	Завершающее - итог сочетания всех входных событий. Конечное - результат сочетания всех входных, промежуточных и базисных событий	
	Промежуточное - событие, которое не является итоговым или первичным. <i>Это событие обычно является результатом одного или более первичных событий и/или других промежуточных событий.</i>	
Логические символы дерева неисправностей (вентили)	ИЛИ – выходное событие наступает, если наступает любое из входных событий	

Категория логического элемента	Название и причинная взаимосвязь логического элемента	Графическое обозначение
Логические символы дерева неисправностей (вентили)	ИЛИ – выходное событие наступает, если наступает любое из входных событий	
	Мажоритарный – выходное событие наступает, если наступают $m$ или более входных событий из общего числа $n$	
	И – выходное событие наступает, если наступают все входные события	
	И с приоритетом – выходное событие наступает, если входные события наступают последовательно слева направо	
	Запрета – выходное событие наступает, если наступают оба входных события, одно из которых условное (условная вероятность появления выходного события)	
	НЕ – выходное событие наступает, если не наступает входное событие	
	Переноса - вентиль, указывающий на то, что данная часть системы разрабатывается в другой части страницы или диаграммы	

Основной принцип построения ДО заключается в последовательной постановке вопроса: по каким причинам система может перейти в состояние отказа, т.е. в осуществлении анализа «сверху-вниз». Исходными данными при построении ДО являются перечни критериев отказов составляющих систему элементов и условий, способствующих переходу элементов (групп элементов) в состояние отказа.

Структурными элементами ДО являются события, связанные между собой логическими операторами. При построении ДО различают следующие типы событий:

– вершинное (в некоторых источниках – завершающее, результирующее) событие – наступление отказа системы в целом;

– промежуточное событие – сложное событие с логическим оператором, являющееся одной из возможных причин вершинного события. Его выявляют в ходе анализа причин вершинного события и подвергают дальнейшему анализу. В качестве промежуточных событий, в частности, могут выступать отказы основных функций сложной системы, отказы составных частей и элементов, либо комбинации из отказов части элементов и событий, отражающих условия, способствующие возникновению отказов;

– начальное (базовое, основное, первичное) событие – простое событие, означающее отказ элемента, которое в дальнейшем не анализируется в связи с наличием достаточного объема данных для расчета вероятности его появления.

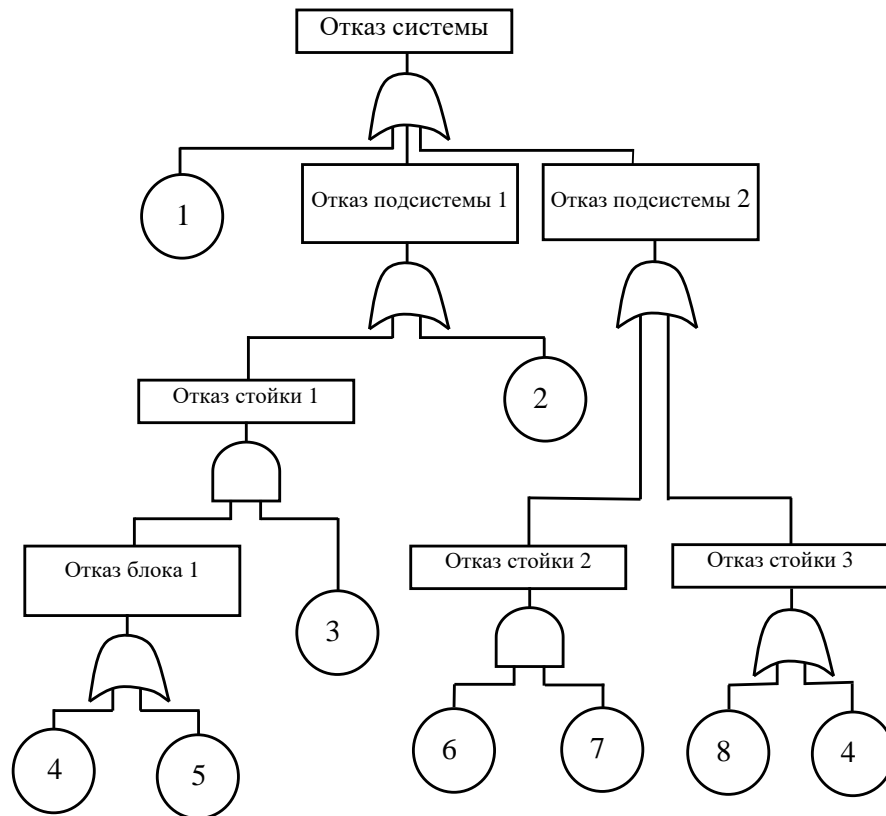


Рисунок 2.18– Пример дерева отказов

Обозначения на рисунке 2.18:



– Отказ «С»: отказ «1» ИЛИ отказ «ПС1» ИЛИ отказ ПС2»



– Отказ «Ст1»: отказ «Б1» И отказ «3»

Логические операторы, используемые при построении ДО, могут быть различными. Наиболее часто применяются операторы "И", "ИЛИ", "N из M".

Логический оператор "И" («схема совпадения») означает наличие события на выходе только при наличии события на каждом из его входов.

Логический оператор "ИЛИ" («схема объединения») означает наличие события на выходе при наличии хотя бы одного события на любом из его входов. Логический оператор "N из M" («мажоритарная схема») означает наличие события на выходе при наличии не менее N событий на любой выборке по N и более входов из M.

Соответственно каждому виду события и оператора присваиваются символы, которые используются для графического построения ДО. Начальные события обозначаются окружностями, промежуточные и вершинное – прямоугольниками.

Обозначения наиболее распространенных операторов "И", "ИЛИ", "N из M" показаны на рис. 2.19.



Рисунок 2.19 – Символы логических операторов "И", "ИЛИ", "N из M", используемые для графического построения ДО

Логические операторы обычно при отображении на схеме ДО называют узлами, которые нумеруются последовательно сверху вниз и слева направо, начиная с узла вершинного события.

Для сложных систем построение ДО, адекватного реальности, возможно только на основе глубокого знания структуры системы и ее составных частей, особенностей функционирования оборудования в процессе применения по целевому назначению. Алгоритм процедуры построения ДО в виде блок-схемы приведен на рис. 2.20.

Построение ДО начинается с выбора вершинного события, т.е. такого события, вероятность появления которого требуется оценить. Таким событием в нашем случае является отказ системы. Далее необходимо определить, что считать отказом системы, т.е. необходимо сформулировать критерий ее отказа. Для многофункциональных систем критерием отказа обычно является отказ хотя бы одной из основных функций системы. После определения вершинного события и уяснения критерия его появления выделяются основные компоненты дерева предельного состояния, влияющие на появление вершинного события. Составляется список таких событий.

При занесении событий на схему дерева их выходы подсоединяются ко входу логического узла события верхнего уровня. Если любое событие из некоторого списка вызывает событие верхнего уровня, то используется узел "ИЛИ", если же оно наступает только при совместном сочетании событий – узел "И".

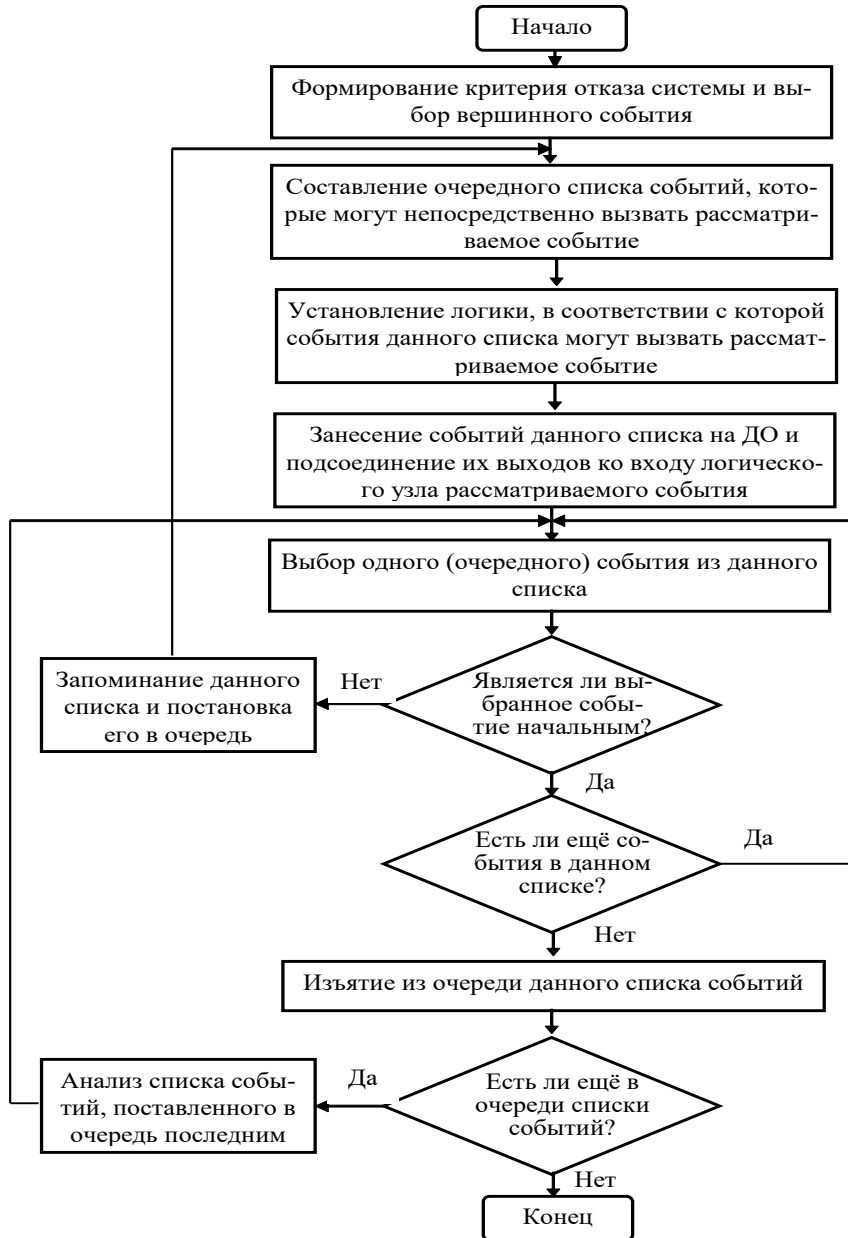


Рисунок 2.20 – Схема алгоритма построения дерева отказов

Следующим этапом построения ДО является детальный анализ условий появления промежуточных событий ДО. Составляется список таких событий. Из данного списка выбирается конкретное событие и решается, следует ли проводить более детальный структурный анализ данного события или нет. Следует отметить, что излишняя детализация при структурном разбиении событий не всегда приносит положительный результат. Это часто связано с невозможностью сбора достаточного количества исходных данных для оценивания вероятностей событий нижнего уровня разбиения. Иногда полезнее остановиться на том уровне детализации, на котором существует максимально благоприятное сочетание возможностей оценивания вероятности события, т.е. наличие возможностей построения модели возникновения события на другом классе моделей и доступности к источникам исходной информации.

Если событие не подлежит дальнейшему структурному анализу, то оно считается начальным (на схеме ДО этот факт отражается окружностью), и переходят к рассмотрению другого события данного списка (если оно есть). Если есть необходимость рассмотреть причинно-следственные связи появления данного события, то оно считается промежуточным и обозначается прямоугольником. Список оставшихся событий ставится в очередь для последующего анализа. Выбранное промежуточное событие переходит в разряд рассматриваемых. Составляется очередной список событий, которые могут вызвать рассматриваемое промежуточное событие, устанавливается логика его формирования, условные обозначения заносятся на схему дерева.

Из вновь образованного списка выбирается событие, если оно начальное, то выбирается следующее, если промежуточное, то рассматриваемый список событий ставится в очередь и начинается анализ данного промежуточного события. Так продолжается до тех пор, пока в очередном списке событий все события не окажутся начальными.

Если при рассмотрении очередного списка событий выяснится, что он состоит только из начальных событий, то данный список изымается из очереди и для анализа берётся следующий список из очереди. Вся процедура повторяется до тех пор, пока в очереди не окажется ни одного списка событий. Это будет означать то, что все промежуточные события выражены через начальные.

Процедура построения ДО во многом субъективна, она зависит от глубины знаний исследователем процессов функционирования системы, причинно-следственных связей возникновения отказов ее элементов. Два ДО сложной многокомпонентной системы, построенные разными исследователями, но с использованием одинаковых допущений и приведенного выше алгоритма, внешне будут, скорее всего, отличаться друг от друга, однако приведут к одному и тому же конечному результату при дальнейшей обработке дерева с помощью ЛВМ анализа.

### ***2.4.3 Построение математических моделей для расчета показателей надежности по дереву отказов***

Математические модели для расчета показателей надежности системы по ДО в соответствии с рекомендациями [25] могут быть получены с использованием булева представления ДО и применения метода минимальных сечений.

***2.4.3.1 Булево представление дерева отказов.*** Пусть состояние системы задается некоторой функцией  $Y$ . Предположим, что система с точки зрения надежности может находиться только в двух характерных состояниях: работоспособном ( $Y = 1$ ) и неработоспособном ( $Y = 0$ )

$$Y = \begin{cases} 1, & \text{при работоспособном состоянии;} \\ 0, & \text{при неработоспособном состоянии.} \end{cases} \quad (2.27)$$

Допустим также, что состояние элементов и выполнение заданных условий описывается некоторым вектором

$$X_{\langle n \rangle} = \langle x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n \rangle, \quad (2.28)$$

где  $x_i$  – переменная, характеризующая состояние  $i$ -го элемента, либо выполнение  $i$ -го условия (если  $i$ -й номер условия),  $n$  – общее число элементов системы и наложенных условий.

Пусть каждая переменная  $x_i$  вектора  $X_{\langle n \rangle}$  принимает только два значения  $x_i = 1$ , либо  $x_i = 0$ . Равенство  $x_i = 1$  означает нахождение  $i$ -го элемента в работоспособном состоянии, либо (если  $i$ -й номер условия) – невыполнение наложенного условия. При  $x_i = 0$   $i$ -й элемент находится в состоянии отказа, либо выполнено  $i$ -е условие.

Логической функцией работоспособности (ЛФР) системы будем называть функцию алгебры логики (ФАЛ), связывающую состояние элементов системы и выполнение некоторых заданных условий с работоспособным состоянием системы:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = y(X_{\langle n \rangle}). \quad (2.29)$$

Функцию  $y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$  называют монотонной, если для любых наборов  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  и  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ , таких, что  $\alpha_i \leq \beta_i$  имеет место соотношение

$$y(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \leq y(\beta_1, \dots, \beta_n). \quad (2.30)$$

Объекты, удовлетворяющие этим условиям, называют системами с монотонной структурой. Иначе условие монотонности может быть представлено в следующей форме.

Объект будет обладать монотонной структурой при соблюдении следующих условий:

Если все элементы системы находятся в работоспособном состоянии, а все условия не выполнены, т.е.  $x_i = 1, i = \overline{1, n}$ , то система находится в работоспособном состоянии.

Если все элементы отказали и все условия выполнены, то система переходит в состояние отказа.

Отказ, либо выполнение какого-либо условия, не может перевести систему в работоспособное состояние из неработоспособного, и, наоборот, восстановление отказа элемента для системы, находящейся в работоспособном состоянии, не может вызвать перехода ее в состояние отказа.

Все реальные технические системы с точки зрения перечисленных правил относятся, как правило, к системам с монотонной структурой.

Для монотонной структуры ЛФР системы можно записать с помощью минимальных путей (МП) или минимальных сечений (МС), которые несложно выделить при анализе конкретного дерева отказов.

Путем называется множество элементов  $\{x_j\}, x_j \in X_{<n>}$ , единичное состояние которых обеспечивает единичное состояние ЛФР. Иначе, путь – это набор элементов системы, находящихся в работоспособном состоянии и невыполненных условий, обеспечивающих работоспособное состояние системы.

Минимальным путем называется такая конъюнкция элементов и условий, когда ни одну из компонент нельзя изъять, не нарушив непердельного состояния системы.

Такая конъюнкция может быть записана в виде следующей ФАЛ

$$R_l = \bigwedge_{i \in K_{R_l}} x_i, \quad x_i \in X_{<n>}, \quad (2.31)$$

где  $K_{R_l}$  – означает множество номеров, соответствующих пути  $R_l$ .

Иначе, минимальный путь – это минимальный набор элементов и условий, работоспособное состояние (невыполнение условий) которых обеспечивает работоспособное состояние системы.

Сечением называется множество элементов  $\{x_j\}, x_j \in X_{<n>}$ , нулевое состояние которых обеспечивает нулевое состояние ЛФР.

Иначе, сечение – это набор элементов системы, отказ которых, и условий, выполнение которых, обеспечивают неработоспособное состояние системы.

Минимальным сечением системы называется такая конъюнкция отрицаний его элементов и условий, когда ни одну из компонент нельзя изъять, не нарушив состояния отказа системы.

Такая конъюнкция записывается в виде следующей ФАЛ

$$S_j = \bigwedge_{i \in K_{S_j}} \bar{x}_i, \quad x_i \in X_{<n>}, \quad (2.32)$$

где  $K_{S_j}$  – означает множество номеров, соответствующих сечению  $S_j$ .

Добавление хотя бы одного элемента к МП или МС лишает их свойств минимальности, а удаление – свойств пути, или, соответственно, сечения.

Известно, что любой система с конечным числом элементов и наложенных условий имеет конечное число минимальных путей ( $l=1,2,\dots,d$ ) и минимальных сечений ( $j=1,2,\dots,m$ ).

Тогда условие отказа системы может быть записано двумя различными способами:

а) через минимальные пути

$$\overline{y(x_1, \dots, x_n)} = \bigwedge_{l=1}^d \bar{R}_l = \bigwedge_{l=1}^d \left[ \bigvee_{i \in K_{R_l}} \bar{x}_i \right] = 1 \quad (2.33)$$

в виде конъюнкции отрицаний всех имеющихся минимальных путей;

б) через минимальные сечения

$$\overline{y(x_1, \dots, x_n)} = \bigvee_{j=1}^m S_j = \bigvee_{j=1}^m \left[ \bigwedge_{i \in K_{S_j}} \bar{x}_i \right] = 1 \quad (2.34)$$

в виде дизъюнкции всех имеющихся минимальных сечений.

В свою очередь, условия работоспособности имеют вид:

а) через минимальные пути



$$y(x_1, \dots, x_n) = \bigvee_{l=1}^d R_l = \bigvee_{l=1}^d \left[ \bigwedge_{i \in K_{R_l}} x_i \right] = 1 \quad (2.35)$$

в виде дизъюнкции всех имеющихся минимальных путей;

б) через минимальные сечения

$$y(x_1, \dots, x_n) = \bigwedge_{j=1}^m S_j = \bigwedge_{j=1}^m \left[ \bigvee_{i \in K_{S_j}} x_i \right] = 1 \quad (2.36)$$

в виде конъюнкции отрицаний всех имеющихся минимальных сечений.

Отказ системы не достигается если

$$\left. \begin{array}{l} \bigwedge_{l=1}^d \bar{R}_l = 0, \quad \text{либо} \\ \bigvee_{j=1}^m S_j = 0, \quad \text{либо} \\ \bigvee_{l=1}^d R_l = 1, \quad \text{либо} \\ \bigwedge_{j=1}^m \bar{S}_j = 1. \end{array} \right\} \quad (2.37)$$

Соответственно, условия отказа системы:

$$\left. \begin{array}{l} \bigwedge_{l=1}^d \bar{R}_l = 1, \quad \text{либо} \\ \bigvee_{j=1}^m S_j = 1, \quad \text{либо} \\ \bigvee_{l=1}^d R_l = 0, \quad \text{либо} \\ \bigwedge_{j=1}^m \bar{S}_j = 0. \end{array} \right\} \quad (2.38)$$

Условие (2.31) означает, что в структуре ДО есть хотя бы один МП, либо нет ни одного МС. Условие (2.32) означает, что в структуре ДО нет ни одного МП, либо есть хотя бы одно МС.

**Пример 2.8.** Сформировать условия отказа и работоспособности для системы, ДО которой приведено на рис. 2.18.

Множество минимальных путей, определяемое при анализе ДО, имеет вид (для простоты здесь и далее операция конъюнкции будем обозначать знаком «умножения», т.е.  $x_i \wedge x_j \Leftrightarrow x_i x_j$ ):

$$R_{\{4\}} = \{R_1 = (x_1 x_2 x_3 x_4 x_6 x_8), R_2 = (x_1 x_2 x_3 x_4 x_7 x_8), R_3 = (x_1 x_2 x_4 x_5 x_6 x_8), R_4 = (x_1 x_2 x_4 x_5 x_7 x_8)\}.$$

Множество минимальных сечений ДО имеет вид:

$$S_{\{6\}} = \{S_1 = \bar{x}_1, S_2 = \bar{x}_2, S_3 = \{\bar{x}_3 \bar{x}_5\}, S_4 = \{\bar{x}_6 \bar{x}_7\}, S_5 = \bar{x}_4, S_6 = \bar{x}_8\}.$$

ЛФР системы может быть записана в соответствии с (2.33) как

$$y(x_1, \dots, x_8) = x_1 x_2 x_3 x_4 x_6 x_8 \vee x_1 x_2 x_3 x_4 x_7 x_8 \vee x_1 x_2 x_4 x_5 x_6 x_8 \vee x_1 x_2 x_4 x_5 x_7 x_8,$$

либо в соответствии с (2.36) как

$$y(x_1, \dots, x_8) = x_1 x_2 (x_3 \vee x_5) (x_6 \vee x_7) x_4 x_8.$$

В соответствии с (2.33) имеем:

$$\overline{y(x_1, \dots, x_8)} = (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_6 \vee x_8)(x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_7 \vee x_8)(x_1 \vee x_2 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_6 \vee x_8) \times \\ \times (x_1 \vee x_2 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_7 \vee x_8),$$

а в соответствии с (2.36)

$$\overline{y(x_1, \dots, x_8)} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \bar{x}_7 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_8.$$

Тогда в соответствии с (2.33) условия работоспособности можно представить как:

$$(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_8)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_7 \vee \bar{x}_8)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_8) \times \\ \times (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_7 \vee \bar{x}_8) = 0,$$

либо

$$\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \bar{x}_7 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_8 = 0,$$

либо

$$x_1 x_2 x_3 x_4 x_6 x_8 \vee x_1 x_2 x_3 x_4 x_7 x_8 \vee x_1 x_2 x_4 x_5 x_6 x_8 \vee x_1 x_2 x_4 x_5 x_7 x_8 = 1,$$

либо

$$x_1 x_2 (x_3 \vee x_5)(x_6 \vee x_7) x_4 x_8 = 1.$$

В соответствии с выражением (2.36), следующие условия формируют условия отказа системы:

$$(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_8)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_7 \vee \bar{x}_8)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_8) \times \\ \times (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_7 \vee \bar{x}_8) = 1,$$

либо

$$\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \bar{x}_7 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_8 = 1,$$

либо  $x_1 x_2 x_3 x_4 x_6 x_8 \vee x_1 x_2 x_3 x_4 x_7 x_8 \vee x_1 x_2 x_4 x_5 x_6 x_8 \vee x_1 x_2 x_4 x_5 x_7 x_8 = 0$ ,

либо  $x_1 x_2 (x_3 \vee x_5)(x_6 \vee x_7) x_4 x_8 = 0$ .

Для дальнейшего анализа может быть выбрана та форма задания условий отказа, которая является наиболее компактной, хотя все остальные формы полностью эквивалентны относительно конечного результата.

Таким образом, булево описание условия отказа системы позволяет наиболее полно, четко и однозначно представить причинно-следственные связи между неработоспособным состоянием системы и состояниями его элементов и другими факторами, определяющими надежность системы.

**2.4.3.2 Построение вероятностной функции работоспособности системы.** Выше показано, как представить в форме функций алгебры логики условия работоспособности системы. Рассмотрим особенности расчета вероятности безотказной работы системы по известным ФАЛ.

Введем следующие обозначения:  $P(t)$  – ВБР системы на интервале  $[0, t]$ ;  $p_i(t)$  – вероятность отсутствия начального события в ДО (ВБР  $i$ -го элемента, либо вероятность невыполнения заданного условия).

Пусть известна ЛФР системы, описанная некоторой произвольной ФАЛ вида (2.29). Вероятностной функцией работоспособности (ВФР) системы будем называть вероятность истинности ЛФР

$$P\{y(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = 1\}. \quad (2.39)$$

Если ввести в рассмотрение вероятность наступления  $i$ -го события в ЛФР

$$p_i = P[x_i = 1],$$

тогда в предположении о независимости событий  $x_i, i = \overline{1, n}$ , функцию (2.39) можно преобразовать к виду

$$P\{y(X_{\langle n \rangle}) = 1\} = P(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n). \quad (2.40)$$

Тогда можно сформулировать правило расчета ВБР: вероятность безотказной работы системы на интервале  $[0; t]$  равна значению ВФР на этом интервале.

Таким образом, задача оценивания ВБР системы при известной ЛФР сводится к нахождению аналитического выражения для ВФР и подстановке в нее значений вероятностей  $p_i$  (вероятностей событий, инверсных базовым событиям ДО), определенных на интервале  $[0; t]$ .

Рассмотрим возможности определения вида выражения ВФР по ЛФР. В общем случае ЛФР представляет собой произвольную ФАЛ.

Из полученных ранее в теории надежности результатов известно, что существуют такие формы задания ФАЛ, которые допускают непосредственный переход в вероятностную функцию (ВФ)  $P\{f(X_{\langle n \rangle}) = 1\}$  заменой логических переменных  $x_i$  вероятностями  $p_i$ , а логических операций – соответствующими арифметическими операциями. Такие ФАЛ называют формами перехода к замещению (ФПЗ).

Если ФАЛ представлена в ФПЗ, то переход к ВФ осуществляется по следующим правилам:

– каждая буква в ФПЗ заменяется вероятностью ее равенства единице, причем

$$P[x_i = 1] = p_i, \quad P[\bar{x}_i = 1] = P[x_i = 0] = 1 - p_i; \quad (2.41)$$

– отрицание функции заменяется разностью между единицей и вероятностью равенства этой функции единице, например

$$P[f(X_{\langle n \rangle}) = 1] = P[\bar{x}_1(x_2\bar{x}_3) = 1] = (1 - p_1)[1 - p_2(1 - p_3)];$$

– операции логического умножения и сложения заменяются операциями арифметического умножения и сложения.

Существуют различные формы перехода к полному замещению. Прежде чем дать их характеристику, приведем ряд определений из алгебры логики [9], поясняющих используемые в дальнейшем понятия.

Выражение вида

$$x_1^{a_1}, x_2^{a_2}, \dots, x_r^{a_r} \quad (2.42)$$

называется элементарной конъюнкцией ( $K_r$ ) ранга  $r$ , где  $a_i$  – двоичная переменная величина, такая, что

$$x_i^{a_i} = \begin{cases} x_i, & \text{если } a_i = 1, \\ \bar{x}_i, & \text{если } a_i = 0. \end{cases}$$

В силу того, что  $x_i\bar{x}_j = 0$  и  $x_i x_i \dots x_i = x_i$ , все символы в  $K_r$  различны.

Выражение вида

$$K_1 \vee K_2 \vee \dots \vee K_s, \quad (2.43)$$

где  $K_j$  – элементарные конъюнкции различных рангов, называется дизъюнктивной нормальной формой (ДНФ).

Если функция  $f(X_{<n>})$  записана в ДНФ, причем ранг каждой элементарной конъюнкции равен  $n$ , то такая ДНФ называется совершенной ДНФ (СДНФ).

Две элементарные конъюнкции называются ортогональными, если их произведение равно нулю.

ДНФ называется ортогональной ДНФ (ОДНФ) если все ее члены попарно ортогональны.

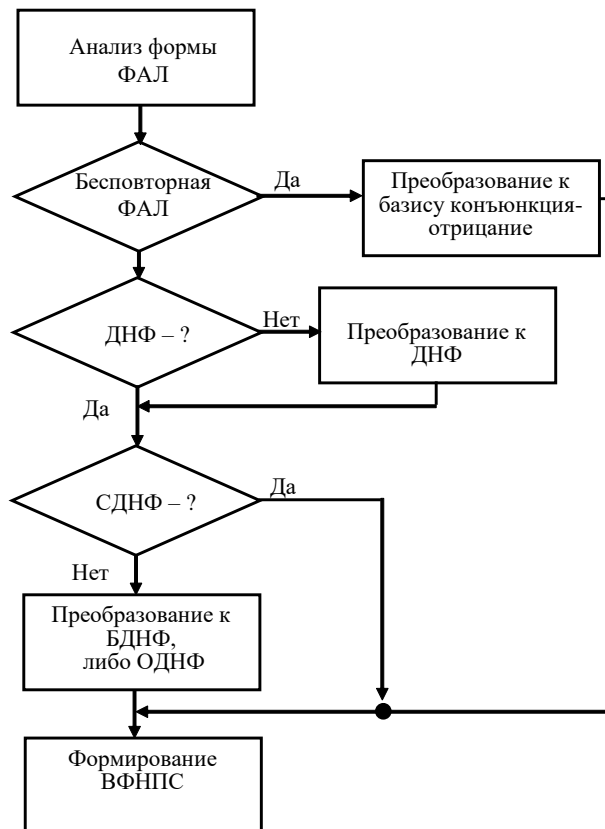


Рисунок 2.21 – Схема алгоритма преобразования ФАЛ к ФПЗ

Бесповторной ДНФ называется такая ДНФ, в которой все буквы имеют разные номера.

Известно, что ФАЛ, записанные в СДНФ, ОДНФ или в форме бесповторной ФАЛ в базисе конъюнкция-отрицание, являются ФПЗ.

Приведем общий алгоритм преобразования ФАЛ произвольной формы к ФПЗ (рис. 2.21).

На первом этапе анализируется форма ФАЛ.

Если ФАЛ является бесповторной, т.е. с неповторяющимися номерами переменных, то они преобразуются в ФПЗ по правилу де Моргана (к базису конъюнкция-отрицание).

При повторной форме ФАЛ она преобразуется в ДНФ и анализируется её вид. Если преобразованная ФАЛ имеет вид СДНФ, то ФПЗ получена, и можно формировать ВФР по правилам замещения. В противном случае используется ряд методов, к основным из которых относятся метод ортогонализации и метод разрезания.

**Метод ортогонализации** основывается на использовании следующих утверждений.

Отрицание элементарной конъюнкции ранга  $S$   $K_i = x_1x_2\dots x_S$  эквивалентно дизъюнкции

$$\bar{K}_i = \bar{x}_1 \vee x_1\bar{x}_2 \vee \dots \vee x_1x_2\dots x_{s-1}\bar{x}_s. \quad (2.44)$$

В матричной форме записи логических функций данное преобразование имеет вид

$$\bar{K}_i = \overline{x_1x_2\dots x_s} = \left| \begin{array}{c} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \dots \\ \bar{x}_s \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \bar{x}_1 \\ x_1\bar{x}_2 \\ \dots \\ x_1x_2\dots x_{s-1}\bar{x}_s \end{array} \right|. \quad (2.45)$$

Булева функция  $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$  представляется в ДНФ в виде

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{i=1}^m K_i, \quad i \leq 2^n, \quad (2.46)$$

и эквивалентна функции

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = K_1 \vee \bar{K}_1K_2 \vee \bar{K}_1\bar{K}_2K_3 \vee \dots \vee \bar{K}_1\bar{K}_2\dots\bar{K}_{m-1}K_m, \quad (2.47)$$

или в матричной форме записи:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left| \begin{array}{c} K_1 \\ K_2 \\ \dots \\ K_m \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} K_1 \\ \bar{K}_1K_2 \\ \dots \\ \bar{K}_1\bar{K}_2\dots\bar{K}_{m-1}K_m \end{array} \right|. \quad (2.48)$$

Если вместо каждого выражения  $\bar{K}_i$  ( $i \leq m$ ) подставить его представление согласно (2.44), то после приведения дизъюнкции (2.47) к ДНФ (раскрытием скобок) получим ОДНФ булевой функции  $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{i=1}^m K_i = \bigvee_{i=1}^S O_i, \quad (2.49)$$

где  $O_i$  – ортогональные члены функции  $y(X_{\langle n \rangle})$ , записанной в ОДНФ;

$S$  – число членов ОДНФ.

Преобразовав ЛФР к ОДНФ, можно приступить к формированию ВФР по правилам замещения.

**Метод разрезания** основывается на следующем утверждении.

Для любой структурной функции  $y$  порядка  $n$  справедливо следующее

$$y(X_{\langle n \rangle}) = x_i y(1_i, X_{\langle n \rangle}) \vee \bar{x}_i y(0_i, X_{\langle n \rangle}), \quad \text{для всех } x_i = \bar{1}, n.$$

Таким образом, если аргумент  $x_i$  функции  $y$  является совместной двоичной переменной, то преобразование (2.40) дает возможность перейти к

дизъюнкции двух несовместных высказываний, причем в первое высказывание аргумент  $x_i$  входит своим утверждением, а во второе – отрицанием. Функции  $y_1$  и  $y_0$  отличаются от функции  $y$  тем, что в них везде вместо аргумента  $x_i$  подставлены соответственно  $1$  и  $0$ .

Аргументы  $x_i$  и  $\bar{x}_i$  можно принять за несовместимые гипотезы, образующие полную группу событий и, следовательно, есть все основания применять формулу полной вероятности. Необходимо также, чтобы функции  $y_1$  и  $y_0$  были представлены в ФПЗ. С этой целью процедуру разрезания повторяют требуемое число раз.

На первом шаге разрезание функции  $y(X_{<n>})$  производится по той из переменных, которая большее число раз встречается в выражении функции. После первого шага получают разложение (2.30). Затем функции  $y_1$  и  $y_0$  упрощаются по правилам алгебры логики и анализируются на предмет наличия в них повторяющихся переменных. При их наличии, процедура разрезания применяется к  $y_1$  и  $y_0$ .

$$\begin{aligned} y_1 &= x_j y_{11}(1_j, y_1) \vee \bar{x}_j y_{10}(0_j, y_1), \\ y_0 &= x_k y_{01}(1_k, y_0) \vee \bar{x}_k y_{00}(0_k, y_0), \\ y &= x_i(x_j y_{11} \vee \bar{x}_j y_{10}) \vee \bar{x}_i(x_k y_{01} \vee \bar{x}_k y_{00}). \end{aligned}$$

Операция разрезания проводится до тех пор, пока на очередном шаге не окажется, что ни в одну функцию ни одна переменная не входит более одного раза. Таким образом, получаем дизъюнкцию, каждый член которой представляет собой неповторную ФАЛ, в общем случае произвольную.

Применив к  $y_{\rho_i}$ , где  $\rho_i$  – множество индексов типа  $0, 1, 01, 11, \dots$  правило де Моргана, получим неповторную ФАЛ в базисе конъюнкция-отрицание. Такая форма ФАЛ является ФПЗ.

Результатом выполнения разрезания исходная ФАЛ преобразуется к виду

$$y(X_{<n>}) = \bigvee_{i=1}^S H_i y_{\rho_i}(y_{\rho_{i-1}}),$$

где  $S$  – число членов дизъюнкции;

$y_{\rho_i}$  – неповторные ФАЛ в базисе конъюнкция-отрицание;

$H_i$  – несовместные гипотезы, образующие полную группу.

ВФР вычисляется по формуле полной вероятности

$$P\{y(X_{<n>}) = 1\} = \sum_{i=1}^S P[H_i]P[y | H_i] = \sum_{i=1}^S P[H_i]P[y_{\rho_i}], \quad (2.50)$$

ФАЛ, характеризующие гипотезы  $H_i$  и  $y_{\rho_i}$ , представлены в форме неповторной ФАЛ в базисе конъюнкция-отрицание, что позволяет далее применить правило замещения.

**Пример 2.8.** Рассмотрим ЛФР системы, составленную по ДО, приведенному на рис. 2.11. ЛФР, образованная на основе МС по правилу (2.16), имеет вид

$$y = x_1 x_2 (x_3 \vee x_5) (x_6 \vee x_7) x_4 x_8.$$

В данной ФАЛ отсутствуют повторяющиеся элементы, поэтому она может быть преобразована к ФПЗ по правилу де Моргана

$$y = x_1 x_2 \overline{\overline{x_3 x_5}} \overline{\overline{x_6 x_7}} x_4 x_8.$$

Далее по правилу замещения получаем выражение для ВФР

$$P(p_1, \dots, p_8) = p_1 p_2 [1 - (1 - p_3)(1 - p_5)][1 - (1 - p_6)(1 - p_7)] p_4 p_8.$$

После преобразований окончательно получаем

$$P(p_1, \dots, p_8) = p_1 p_2 p_4 p_8 (p_3 + p_5 - p_3 p_5)(p_6 + p_7 - p_6 p_7). \quad (2.51)$$

ВБР с учетом (2.31) рассчитывается по формуле

$$P(t) = p_1(t) p_2(t) p_4(t) p_8(t) (p_3(t) + p_5(t) - p_3(t) p_5(t)) (p_6(t) + p_7(t) - p_6(t) p_7(t)). \quad (2.52)$$

**Пример 2.9.** Если в основу образования ЛФР положить правило (2.52), то ее выражение, как было показано выше, имеет следующий вид

$$y(x_1, \dots, x_8) = x_1 x_2 x_3 x_4 x_6 x_8 \vee x_1 x_2 x_3 x_4 x_7 x_8 \vee x_1 x_2 x_4 x_5 x_6 x_8 \vee x_1 x_2 x_4 x_5 x_7 x_8. \quad (2.53)$$

ФАЛ (2.53) является повторной и выражена в ДНФ (несовершенной). Поэтому применим алгоритм разрезания.

В выражении (36) переменные  $x_1, x_2, x_4, x_8$  задействованы по четыре раза, а остальные по два. Разрежем ФАЛ (2.53) по переменной  $x_1$

$$y(x_1, \dots, x_8) = x_1 (x_2 x_3 x_4 x_6 x_8 \vee x_2 x_3 x_4 x_7 x_8 \vee x_2 x_4 x_5 x_6 x_8 \vee x_2 x_4 x_5 x_7 x_8) \vee \overline{x_1} 0.$$

Применив аналогичные преобразования относительно  $x_2, x_4, x_8$  имеем

$$y(x_1, \dots, x_8) = x_1 x_2 x_4 x_8 (x_3 x_6 \vee x_3 x_7 \vee x_5 x_6 \vee x_5 x_7) \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_4} \overline{x_8} \cdot 0 = \\ = x_1 x_2 x_4 x_8 (x_3 x_6 \vee x_3 x_7 \vee x_5 x_6 \vee x_5 x_7).$$

ФАЛ в круглых скобках является повторной и должна быть разрезана. Допустим разрезание произойдет относительно переменной  $x_3$

$$y(x_1, \dots, x_8) = x_1 x_2 x_4 x_8 [x_3 (x_6 \vee x_7 \vee x_5 x_6 \vee x_5 x_7) \vee \overline{x_3} (x_5 x_6 \vee x_5 x_7)],$$

далее по  $x_5$

$$y(x_1, \dots, x_8) = x_1 x_2 x_4 x_8 \{ [x_3 x_5 (x_6 \vee x_7 \vee x_6 \vee x_7) \vee x_3 \overline{x_5} (x_6 \vee x_7)] \vee \\ \vee \overline{x_3} x_5 (x_6 \vee x_7) \vee \overline{x_3} \overline{x_5} 0 \}. \quad (2.54)$$

Преобразовав (2.34), получим

$$y(x_1, \dots, x_8) = x_1 x_2 x_4 x_8 \{ [x_3 x_5 (x_6 \vee x_7) \vee x_3 \overline{x_5} (x_6 \vee x_7)] \vee \overline{x_3} x_5 (x_6 \vee x_7) \}. \quad (2.55)$$

Из (2.35) следует, что необходимо рассмотреть следующие гипотезы

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= x_1 x_2 x_4 x_8 x_3 x_5 \\ H_2 &= x_1 x_2 x_4 x_8 x_3 \overline{x_5} \\ H_3 &= x_1 x_2 x_4 x_8 \overline{x_3} x_5 \end{aligned} \right\}. \quad (2.56)$$

Применив правило Де Моргана к выражению  $x_6 \vee x_7$ , получим

$$\overline{\overline{x_6 \vee x_7}} = \overline{\overline{x_6} \cdot \overline{x_7}}. \quad (2.57)$$

С учетом (2.36), (2.37) ВФР имеет вид (см. (2.30))

$$P(p_1, \dots, p_8) = p_1 p_2 p_4 p_8 p_3 p_5 [1 - (1 - p_6)(1 - p_7)] + p_1 p_2 p_4 p_8 p_3 (1 - p_5) \times \\ \times [1 - (1 - p_6)(1 - p_7)] + p_1 p_2 p_4 p_8 (1 - p_3) p_5 [1 - (1 - p_6)(1 - p_7)].$$

Выполнив преобразования и раскрыв скобки, окончательно имеем:

$$P(p_1, \dots, p_8) = p_1 p_2 p_4 p_8 (p_3 + p_5 - p_3 p_5) (p_6 + p_7 - p_6 p_7); \quad (2.58)$$

$$P(t) = p_1(t) p_2(t) p_4(t) p_8(t) (p_3(t) + p_5(t) - p_3(t) p_5(t)) (p_6(t) + p_7(t) - p_6(t) p_7(t)). \quad (2.59)$$

Из сравнения (2.52) и (2.59) видно, что различная форма задания ЛФР системы приводит лишь к различиям в методах ее преобразования к ФПЗ, и не влияет на конечный результат определения вида ВФР.

#### **2.4.4 Основные математические выражения для расчета показателей надежности восстанавливаемой системы с известной ВФР**

С учетом допущений, можно записать выражение для вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента системы на интервале  $[0; t]$

$$p_i(t) = \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-\frac{t}{\bar{T}_i}\right), \quad (2.60)$$

где  $\bar{T}_i$  – значение оценки средней наработки на отказ  $i$ -го элемента системы.

Пусть по результатам анализа ДО получено аналитическое выражение для ВФР системы

$$P = \varphi(p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (2.61)$$

где  $n$  – число элементов нижнего уровня в ДО.

Подставив в (2.61) вместо  $p_i$  выражение для  $p_i(t)$ , определяемое на основе (2.60), получим выражение для зависимости ВБР системы от величины интервала  $[0; t]$

$$P(t) = \varphi[p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)]. \quad (2.62)$$

Тогда можно записать основные математические выражения для расчета значений основных показателей надежности системы.

Средняя наработка системы на отказ

$$\bar{T}_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \varphi[p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)] dt.$$

Коэффициент готовности системы

$$K_G = \varphi(K_{G1}, K_{G2}, \dots, K_{Gn}),$$

где  $K_{Gi}$  – коэффициент готовности  $i$ -го элемента, рассчитываемый по формуле

$$K_{Gi} = \frac{\bar{T}_i}{\bar{T}_i + \bar{\tau}_i},$$

$\bar{\tau}_i$  – оценка среднего времени восстановления  $i$ -го элемента.

Коэффициент оперативной готовности системы определяется по выражению

$$K_{OG}(t) = K_G \times P(t),$$



где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы системы за время  $t$ , определяемая по формуле (2.62).

Для оценивания степени влияния надежности элемента на надежность системы в целом может быть применен коэффициент значимости (чувствительности) элемента

$$k_i^{3H} = \frac{\partial P}{\partial p_i} = \varphi_i^1(p_1, p_2, \dots, p_n) - \varphi_i^0(p_1, p_2, \dots, p_n),$$

где  $\varphi_i^1 = \varphi(p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, 1, p_{i+1}, \dots, p_n)$ ,  $\varphi_i^0 = \varphi(p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, 0, p_{i+1}, \dots, p_n)$ .

Часто применяется также коэффициент влияния элемента на надежность системы

$$k_i^B = \frac{\partial P}{\partial p_i} p_i.$$

## 2.5 Метод Марковского анализа

### 2.5.1 Основные положения Марковского анализа

Марковский анализ является одним из аналитических методов анализа надежности и может использоваться для оценки и анализа вероятностных характеристик систем на всех этапах жизненного цикла [2].

Относительные достоинства различных методов и возможность их индивидуального или комплексного применения для оценки вероятностных характеристик системы или компонента должны исследоваться до принятия решения об использовании методов Марковского анализа.

Основы применения метода изложены в [29]. В основе метода Марковского анализа лежит теория случайных процессов [2,7]. Наиболее детально ознакомиться с применением метода Марковского анализа для различного класса систем можно в [12].

При применении методов Марковского анализа используют диаграмму состояний и переходов, которая является графическим представлением функционирования системы и моделирует аспекты надежности поведения системы во времени. Система рассматривается как набор элементов, каждый из которых может существовать только в одном из двух состояний: **неработоспособном** или **работоспособном**. Система в целом, однако, может существовать в различных состояниях, каждое из которых определяется специфической комбинацией работоспособного и неработоспособного состояний ее элементов. Таким образом, в момент отказа или восстановления элемента система переходит из одного состояния в следующее. Обычно эту модель называют моделью дискретных состояний с непрерывным временем. В соответствии с этим способом представления изменения состояний системы применяют методологию анализа пространства состояний.

Анализ пространства состояний применяют при исследовании надежности систем с резервированием или систем, отказ которых зависит от последовательных событий, или систем со сложными стратегиями ТО (приоритетное восстановление, проблемы организации очереди, ограниченный ресурс). Используемая для анализа надежности системы модель дискретных состояний должна отражать функционирование системы в отношении стратегий технического обслуживания.

При расчете показателей надежности восстанавливаемых объектов и систем наиболее распространено допущение:

- экспоненциальное распределение наработки между отказами;
- экспоненциальное распределение времени восстановления.

Допущение во многом справедливо, поскольку, во-первых, экспоненциальное распределение наработки описывает функционирование системы на участке нормальной эксплуатации, во-вторых, экспоненциальное распределение описывает процесс без «предыстории».

Применение экспоненциального распределения для описания процесса восстановления позволяет при ординарных независимых отказах представить анализируемые системы в виде марковских систем.

Случайный процесс в какой либо физической системе  $S$ , называется марковским, если он обладает следующим свойством: для любого момента  $t_0$  вероятность состояния системы в будущем ( $t > t_0$ ) зависит только от состояния в настоящем ( $t = t_0$ ) и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние, иначе, при фиксированном настоящем будущее не зависит от предыстории процесса – прошлого (рис. 2.22).

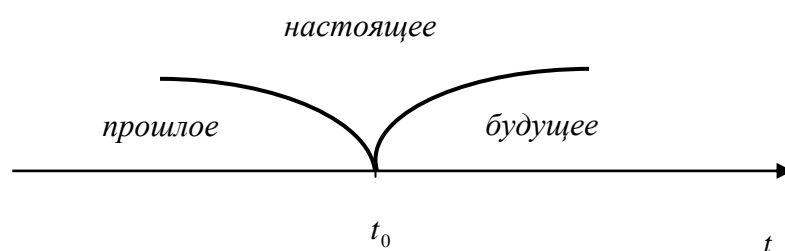


Рисунок 2.22 –Временная интерпретация марковского процесса

Для марковского процесса «будущее» зависит от «прошлого» только через «настоящее», т. е. будущее протекание процесса зависит только от тех прошедших событий, которые повлияли на состояние процесса в настоящий момент. Марковский процесс, как процесс без последствия, не означает полной независимости от прошлого, поскольку оно проявляется в настоящем.

При использовании метода, в общем случае, для системы  $S$ , необходимо иметь математическую модель в виде множества состояний системы  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , в которых она может находиться при отказах и восстановлениях элементов.

В качестве **основных допущений** принимаются:

– отказавшие элементы системы (или сам рассматриваемый объект) немедленно восстанавливаются (начало восстановления совпадает с моментом отказа);

– отсутствуют ограничения на число восстановлений;

– если все потоки событий, переводящих систему (объект) из состояния в состояние, являются пуассоновскими (простейшими), то случайный процесс переходов будет марковским процессом с непрерывным временем и дискретными состояниями  $S_1, S_2, \dots, S_n$ .

**Ограничения**, связанные с вероятностью перехода, можно сформулировать следующим образом:

– переходы состояний являются статистически независимыми событиями;

– интенсивность отказов  $\lambda$  и интенсивность восстановлений  $\mu$  постоянны.

Главным преимуществом применения методов Марковского анализа с учетом допущений и ограничений, описанных выше, является то, что стратегии технического обслуживания, например, приоритеты восстановления, можно легко смоделировать. Кроме того, в модели можно отразить порядок, в котором происходят многократные отказы. Необходимо отметить, что другие методы анализа надежности, например, анализ дерева неисправностей (дерева отказов) и метод структурной схемы надежности, не позволяют учесть сложные стратегии технического обслуживания.

Хотя анализ пространства состояний с теоретической точки зрения является гибким и универсальным, при решении трудных практических задач необходимы специальные меры предосторожности.

Главная проблема заключается в том, что количество состояний системы и возможных переходов быстро возрастает с ростом количества элементов в системе. В случае большого количества состояний и переходов велика вероятность ошибок и искажений. Чтобы уменьшить это явление, желательно использовать некоторые правила составления диаграммы. Кроме того, используемые расчетные методы могут быть достаточно сложны и могут требовать применения специальных компьютерных программ и/или помощи экспертов в области прикладной математики.

Кроме того, что методы Марковского анализа подходят для моделирования стратегий технического обслуживания, они также дают возможность графически отображать процесс отказов/восстановлений, который представляют в виде переходов от одного символа состояния к другому, вместе составляющих диаграмму состояний и переходов системы. Сумма всех вероятностей состояний равна единице. В любой момент времени системе соответствует только одно состояние в диаграмме состояний и переходов. Если по практическим причинам состояния с низкой вероятностью опущены, выполнение вышеупомянутого условия будет только приближенным.

Описанные методы моделирования могут также применяться к системам, в которых некоторые или все элементы являются невозстанавливаемыми. Очевидно, что система с невозстанавливаемыми элементами может рассматриваться как специальный случай системы с восстанавливаемыми элементами, у которых время восстановления будет бесконечным.

### 2.5.2 Основные правила построения модели

Математическую модель изображают в виде графа состояний. Элементы графа:

- кружки (вершины графа  $S_1, S_2, \dots, S_n$ ) – возможные состояния системы  $S$ , возникающие при отказах элементов;
- стрелки – возможные направления переходов из одного состояния  $S_i$  в другое  $S_j$ .

Над/под стрелками указываются интенсивности переходов.

Примеры диаграмм графа представлено на рис. 2.23.

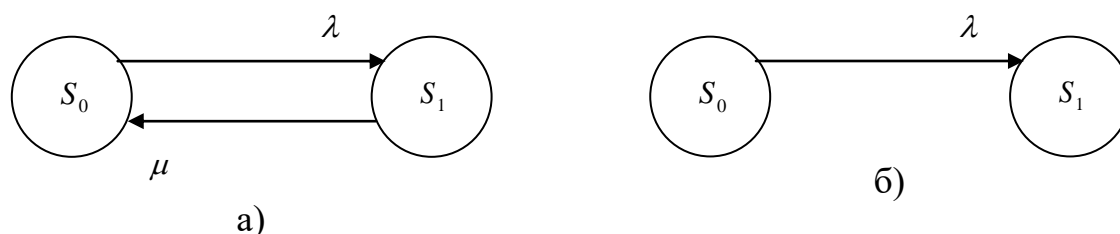


Рисунок 2.23 – Примеры диаграмм графа состояний системы с восстановлением («восстанавливаемый элемент») (а) и системы без восстановления («невозстанавливаемый элемент») (б)

На рис 2.23 введены следующие обозначения:

- $S_0$  – работоспособное состояние;
- $S_1$  – состояние отказа.

Граф состояний отражает конечное (дискретное) число возможных состояний системы  $S_1, S_2, \dots, S_n$ . Каждая из вершин графа соответствует одному из состояний.

Для описания случайного процесса перехода состояний (отказ/восстановление) применяют вероятности состояний

$$P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t), \dots, P_n(t),$$

где  $P_i(t)$  – вероятность нахождения системы в момент  $t$  в  $i$ -м состоянии,  $P_i(t) = P\{S(t) = S_i\}$ .

Очевидно, что для любого  $t$

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1 \quad (2.63)$$

По графу состояний (рис. 2.24) составляется система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (уравнений Колмогорова-Чепмена), имеющих вид

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{l=1}^m \lambda_{li} P_l(t) - \sum_{j=1}^q \lambda_{ij} P_i(t). \quad (2.64)$$

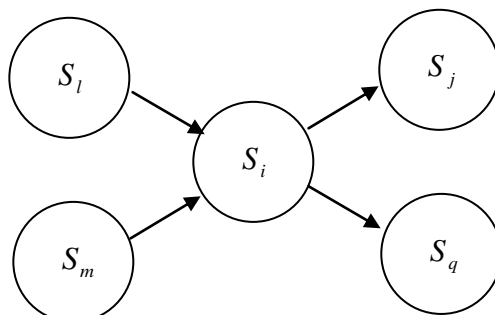


Рисунок 2.24 – Диаграмма графа состояний

В общем случае, интенсивности потоков  $\lambda_{ij}$  и  $\mu_{ij}$  могут зависеть от времени  $t$ .

При составлении дифференциальных уравнений пользуются простым мнемоническим правилом:

- а) в левой части – производная по времени  $t$  от  $P_i(t)$ ;
- б) число членов в правой части равно числу стрелок, соединяющих рассматриваемое состояние с другими состояниями;
- в) каждый член правой части равен произведению интенсивности перехода на вероятность того состояния, из которого выходит стрелка;
- г) знак произведения положителен, если стрелка входит в рассматриваемое состояние, и отрицателен, если стрелка выходит из него.

Чтобы решить систему дифференциальных уравнений для вероятностей состояний  $P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t), \dots, P_n(t)$  необходимо задать начальное значение вероятностей  $P_1(0), P_2(0), \dots, P_i(0), \dots, P_n(0)$ , при  $t=0$ , сумма которых равна единице:

Если в начальный момент  $t=0$  состояние системы известно, например,  $S(t=0) = S_i$ , то  $P_i(0) = 1$ , а остальные равны нулю

$$\sum_{i=1}^n P_i(0) = 1.$$

### 2.5.3 Показатели надежности восстанавливаемых систем

Все состояния системы  $S$  можно разделить на подмножества:

$S_K \subset S$  – подмножество состояний  $j = \overline{1, K}$ , в которых система работоспособна;

$S_M \subset S$  – подмножество состояний  $z = \overline{1, M}$ , в которых система неработоспособна.

$$\begin{aligned} S &= S_K \cup S_M, \\ S_K \cap S_M &= \emptyset. \end{aligned}$$

**Функция готовности  $\Gamma(t)$  системы.** Функция готовности  $\Gamma(t)$  системы определяет вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии в момент  $t$

$$\Gamma(t) = \sum_{j=1}^K P_j(t) = 1 - \sum_{z=1}^M P_z(t), \quad (2.65)$$

где  $P_j(t)$  – вероятность нахождения системы в работоспособном  $j$ -м состоянии;

$P_z(t)$  – вероятность нахождения системы в неработоспособном  $z$ -м состоянии.

**Функция простоя  $\Pi(t)$  системы.** Функция простоя  $\Pi(t)$  системы определяет вероятность нахождения системы в неработоспособном состоянии в момент  $t$

$$\Pi(t) = 1 - \Gamma(t) = \sum_{z=1}^M P_z(t). \quad (2.66)$$

**Коэффициент готовности  $K_r$  и коэффициент простоя  $K_{\Pi}$  системы.** Коэффициент готовности  $K_r$  и коэффициент простоя  $K_{\Pi}$  системы определяются при установившемся режиме эксплуатации (при  $t \rightarrow \infty$ ). При  $t \rightarrow \infty$  устанавливается предельный стационарный режим, в ходе которого система переходит из состояния в состояние, но вероятности состояний уже не меняются

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t) = P_i.$$

Коэффициент готовности  $K_r$  можно рассчитать по системе (2.64) дифференциальных уравнений, приравнявая нулю их левые части  $\frac{dP_i(t)}{dt} = 0$ , т.к.

$P_i = \text{const}$  при  $t \rightarrow \infty$ . Тогда система уравнений (2.64) превращается в систему алгебраических уравнений вида

$$0 = \sum_{l=1}^m \lambda_{li} P_l(t) - \sum_{j=1}^q \lambda_{ij} P_i(t), \quad (2.67)$$

и коэффициент готовности

$$K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t), \quad (2.68)$$

есть предельное значение функции готовности при установившемся режиме  $t \rightarrow \infty$ .

А коэффициент простоя:

$$K_{\Pi} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pi(t) \quad (2.69)$$

есть предельное значение функции простоя при установившемся режиме  $t \rightarrow \infty$ .

$$K_r = 1 - K_{\Pi}. \quad (2.70)$$

**Параметр потока отказов системы.** Параметр  $\omega(t)$  потока отказов системы определяется по выражению

$$\omega(t) = \sum_{j=1}^K \sum_{z=1}^M \lambda_{jz} P_j(t), \quad (2.71)$$

где  $\lambda_{jz}$  – интенсивности (обобщенное обозначение) переходов из работоспособного состояния в неработоспособное.

**Функция потока отказов системы.** Функция потока  $W(t)$  отказов системы определяется по выражению

$$W(t) = \int_0^t \omega(t) dt \quad (2.72)$$

**Средняя наработка между отказами на интервале  $[0; t]$ .** Средняя наработка между отказами на интервале  $[0; t]$  определяется по выражению

$$\bar{T}_0(t) = \frac{\int_0^t \Gamma(t) dt}{W(t)}. \quad (2.73)$$

При  $t \rightarrow \infty$ , когда  $P_j(t = \infty) = P_j$ , средняя наработка между отказами

$$\bar{T}_0 = \frac{K_{\Gamma}}{\omega}, \quad (2.74)$$

где  $\omega = \omega(\infty)$ .

## 2.5.4 Примеры применения Марковского метода

**2.5.4.1 Система с восстановлением с двумя состояниями.** В качестве примера применения Марковского метода для определения показателей надежности рассмотрим восстанавливаемый объект (рис. 2.25), у которого поток отказов простейший (пуассоновский) с параметром потока  $\omega = \lambda = \frac{1}{\bar{T}_0}$ , а распределение времени восстановления подчиняется

экспоненциальному распределению с интенсивностью восстановления  $\mu = \frac{1}{\bar{T}_B}$  ( $\bar{T}_0$  – средняя наработка между отказами,  $\bar{T}_B$  – среднее время восстановления).

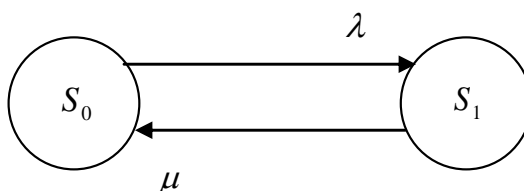


Рисунок 2.25 – Диаграмма графа состояний

Для данного примера:

- $S_0$  – работоспособное состояние;
- $S_1$  – состояние отказа;
- $P_0(t)$  – вероятность работоспособного состояния при  $t$ ;
- $P_1(t)$  – вероятность неработоспособного состояния при  $t$ .

Система дифференциальных уравнений для данного графа состояний имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t). \end{cases} \quad (2.75)$$

Начальные условия: при  $t=0$   $P_0(t=0) = P_0(0) = 1$ , а  $P_1(t=0) = P_1(0) = 0$ , поскольку состояния  $S_0$  и  $S_1$  представляют полную группу событий, то  $P_0(t) + P_1(t) = 1$ .

Будем решать систему уравнений относительно  $P_0(t)$ :

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu(1 - P_0(t)) = -(\lambda + \mu)P_0(t) + \mu. \quad (2.76)$$

Найдем решение дифференциального уравнения (2.76) при ненулевых условиях.

$$\begin{aligned} P_0(t) &= e^{-(\lambda+\mu)t} P_0(0) + \int_0^t e^{-(\lambda+\mu)(t-\tau)} \mu d\tau = e^{-(\lambda+\mu)t} + e^{-(\lambda+\mu)t} \mu \int_0^t e^{(\lambda+\mu)\tau} d\tau = \\ &= e^{-(\lambda+\mu)t} + \mu e^{-(\lambda+\mu)t} \frac{1}{\lambda + \mu} e^{(\lambda+\mu)\tau} \Big|_0^t = e^{-(\lambda+\mu)t} + \mu e^{-(\lambda+\mu)t} \left( \frac{1}{\lambda + \mu} e^{(\lambda+\mu)t} - \frac{1}{\lambda + \mu} \right) = \\ &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda+\mu)t}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\Gamma(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda+\mu)t}, \quad (2.77)$$

$$П(t) = 1 - \Gamma(t) = 1 - P_0(t) = P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda+\mu)t}). \quad (2.78)$$

С помощью полученных выражений (2.55) и (2.56) можно рассчитать вероятность работоспособного состояния и отказа восстанавливаемого объекта в любой момент  $t$ .

Коэффициент готовности системы  $K_r$  определяется при установившемся режиме  $t \rightarrow \infty$ , при этом  $P_i(t) = const$ , поэтому система уравнений (2.75) преобразуется в систему алгебраических уравнений с нулевыми левыми частями:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ 0 = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t). \end{cases} \quad (2.79)$$

Решая систему уравнений (2.54), получим:

$$K_r = P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (2.80)$$



Параметр  $\omega(t)$  потока отказов

$$\omega(t) = \lambda \Gamma(t) = \lambda P_0(t). \quad (2.81)$$

При  $t \rightarrow \infty$  (стационарный установившийся режим восстановления)

$$\omega(t) = \omega(\infty) = \omega = \lambda P_0 = \lambda K_\Gamma. \quad (2.82)$$

Средняя наработка между отказами ( $t \rightarrow \infty$ )

$$\bar{T}_0 = \frac{K_\Gamma}{\omega} = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.83)$$

Среднее время восстановления

$$\bar{T}_B = \frac{1}{\mu}. \quad (2.84)$$

Используя выражения (2.49), (2.55), (2.59) и (2.60)

$$K_\Gamma = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\bar{T}_0}{\bar{T}_0 + \bar{T}_B},$$

$$K_\Pi = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\bar{T}_B}{\bar{T}_0 + \bar{T}_B}.$$

Таким образом, коэффициент готовности характеризует долю времени, в течении которого система работоспособна, а коэффициент простоя характеризует долю времени, в течении которого система ремонтируется.

Анализ изменения  $P_0(t)$  позволяет сделать выводы:

– при мгновенном (автоматическом) восстановлении работоспособности  $\mu = \infty$

$$- P_0(t) = 1;$$

– при отсутствии восстановления  $\mu = 0$

$$- P_0(t) = e^{-\lambda t},$$

т.е. вероятность работоспособного состояния объекта равна ВБР невосстанавливаемого элемента.

**2.5.4.2 Система без восстановления с двумя состояниями.** Метод дифференциальных уравнений может быть использован для расчета показателей надежности и невосстанавливаемых объектов (систем). В этом случае неработоспособные состояния системы являются «поглощающими» и интенсивности  $\mu$  выхода из этих состояний исключаются. Для невосстанавливаемого объекта граф состояний имеет вид (рис. 2.26).

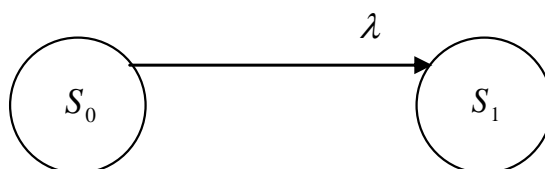


Рисунок 2.26 – Диаграмма графа состояний

Для данного примера:

–  $S_0$  – работоспособное состояние;

–  $S_1$  – состояние отказа («поглощающее» состояние).

Система дифференциальных уравнений для данного графа состояний имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda P_0(t); \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda P_0(t). \end{cases} \quad (2.85)$$

А вероятность безотказной работы

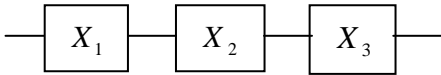
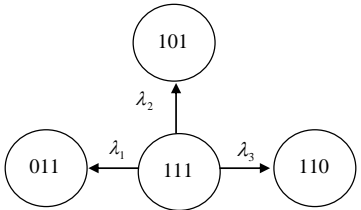
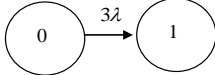
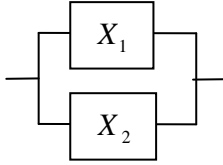
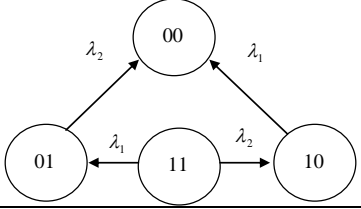
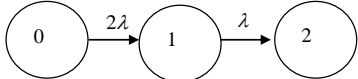
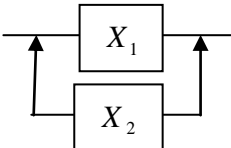
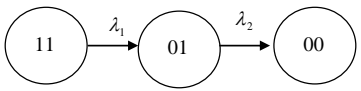
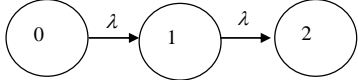
$$P_0(t) = e^{-\lambda t} P_0(0) = e^{-\lambda t} \quad (2.86)$$

**2.5.4.3 Связь структурной схемы надежности с графом состояний.** Переход от структурной схемы надежности к графу состояний необходим:

- 1) при смене методов расчета надежности и сравнении результатов;
- 2) для оценки выигрыша в надежности при переходе от невосстанавливаемой системы к восстанавливаемой.

Рассмотрим типовые структурные схемы надежности (табл. 2.4). Типовые соединения рассмотрены для невосстанавливаемых систем (граф – однонаправленный, переходы характеризуются переходами интенсивности отказов  $\lambda$ ). Для восстанавливаемых систем в графах состояний добавляются обратные переходы, соответствующие интенсивностям восстановлений  $\mu$ .

Таблица 2.4 – Структурные схемы надежности и диаграммы графа состояний

Структурная схема надежности	Диаграмма графа состояний	
	Элементы различной надежности	Равнонадежные элементы
		 $0 = (111), 1 = (011 \vee 101 \vee 110)$
		 $0 = (11), 1 = (01 \vee 10), 2 = (00)$
		 $0 = (11), 1 = (01), 2 = (00)$

**2.5.4.3. Система с восстановлением с множеством состояниями.** Определим коэффициент готовности и коэффициент простоя системы,

содержащей основной и  $n-1$  резервных элементов, находящихся в нагруженном режиме (рис. 2.27). Отказавшие элементы образуют очередь на ремонт, который осуществляется с интенсивностью  $\mu$ . Интенсивность отказа любого элемента равна  $\lambda$ .

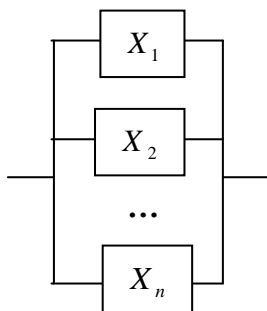


Рисунок 2.27 – Система с параллельным нагруженным резервом

Введём в рассмотрение состояния  $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$ :

- $S_0$  - работоспособны все  $n$  элементов;
- $S_1$  - отказал один элемент, остальные работоспособны;
- $S_2$  - отказали два элемента, остальные исправны;
- $S_i$  - отказали  $i$  элементов, остальные исправны;
- $S_n$  - отказала вся система, т.е. отказали все  $n$  элементов.

Построим граф состояний (рис. 2.28).

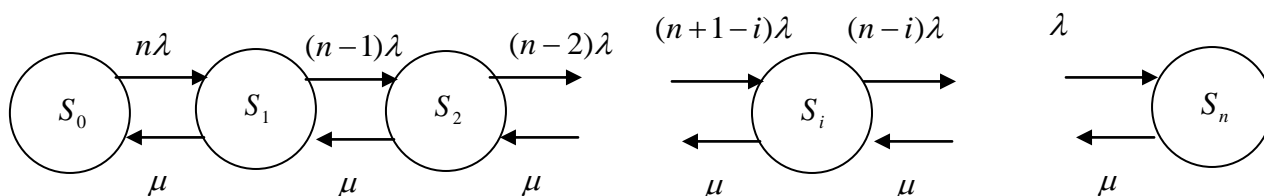


Рисунок 2.28 – Диаграмма графа состояний

Система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -n\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_1}{dt} = n\lambda P_0(t) + \mu P_2(t) - [\mu + (n-1)\lambda]P_1(t); \\ \frac{dP_2}{dt} = (n-1)\lambda P_1(t) + \mu P_3(t) + [\mu + (n-2)\lambda]P_2(t); \\ \vdots \\ \frac{dP_n}{dt} = \lambda P_{n-1}(t) - \mu P_n(t). \end{cases} \quad (2.87)$$

В установившемся режиме имеем  $P_i(t) = P_i = const$ .

В результате из (2.61) получим систему алгебраических уравнений вида:

$$\begin{cases} 0 = -n\lambda P_0 + \mu P_1; \\ 0 = n\lambda P_0 + \mu P_2 - [\mu + (n-1)\lambda]P_1; \\ 0 = (n-1)\lambda P_1 + \mu P_3 + [\mu + (n-2)\lambda]P_2; \\ \vdots \\ 0 = \lambda P_{n-1} - \mu P_n. \end{cases} \quad (2.88)$$

Из системы алгебраических уравнений (2.61) имеем:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{n\lambda}{\mu} P_0; \\ P_2 = \frac{(n-1)\lambda}{\mu} P_1 = \frac{n(n-1)\lambda^2}{\mu^2} P_0; \\ P_3 = \frac{(n-2)\lambda}{\mu} P_2 = \frac{n(n-1)(n-2)\lambda^3}{\mu^3} P_0; \\ \vdots \\ P_n = \frac{n(n-1)(n-2)\dots[n-(n-1)]\lambda^n}{\mu^n} P_0. \end{cases} \quad (2.89)$$

Для вероятностей состояний справедливо следующее соотношение:

$$P_0 + P_1 + \dots + P_n = 1,$$

или

$$P_0 + \frac{n\lambda}{\mu} P_0 + \frac{n(n-1)\lambda^2}{\mu^2} P_0 + \dots + \frac{n(n-1)(n-2)\dots[n-(n-1)]\lambda^n}{\mu^n} P_0 = 1;$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{n\lambda}{\mu} + \frac{n(n-1)\lambda^2}{\mu^2} + \dots + \frac{n(n-1)(n-2)\dots[n-(n-1)]\lambda^n}{\mu^n}} = \frac{1}{\sum_{i=0}^n \frac{n!}{(n-i)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}.$$

Из системы (2.82)

$$P_n = \frac{n! \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{\sum_{i=0}^n \frac{n!}{(n-i)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i} = K_{II}.$$

$$K_I = 1 - K_{II} = 1 - \frac{n! \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{\sum_{i=0}^n \frac{n!}{(n-i)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}.$$

### Пример 2.9.

Дано: Структура системы представлена на рисунке 2.29 и представляет собой соединение трех независимых элементов, обладающих следующими свойствами:

- элементы дублированной пары равнонадежны с интенсивностью отказов  $\lambda_1$ , и интенсивностью восстановлений  $\mu_1$ ;
- интенсивности отказов и восстановлений нерезервированного элемента равны соответственно  $\lambda_2$ , и  $\mu_2$ ;

– систему обслуживает одна ремонтная бригада. Приоритет обслуживания - обратный, т.е. в первую очередь осуществляется восстановление последнего отказавшего элемента;

– в начале функционирования все три элемента находятся в работоспособном состоянии.

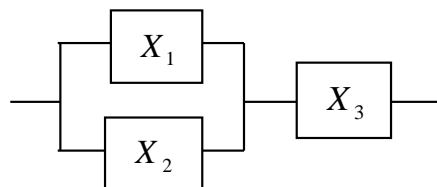


Рисунок 2.29 – Структура системы

Найти: среднее время наработки до отказа, среднее время восстановления и стационарный коэффициент готовности системы.

Решение.

1. Структура системы может быть представлена схемой, приведенной на рисунке 2.30.

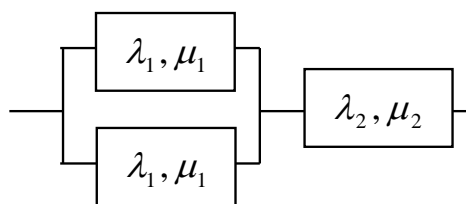


Рисунок 2.30 – Структура системы

2. Отказ системы наступает в том случае, если откажут оба элемента, входящие в дублированную пару («горячий» резерв), или произойдет отказ нерезервированного элемента.

3. Построим граф состояний системы, которым соответствуют следующие состояния (рис.2.31):

- « $S_0$ » - все элементы работоспособны;
- « $S_1$ » - один из элементов дублированной пары отказал и восстанавливается, остальные элементы исправны;
- « $S_2$ » - нерезервированный элемент отказал и восстанавливается, остальные элементы исправны;
- « $S_3$ » - оба элемента дублированной пары отказали, первый отказавший элемент находится в ремонте, второй находится в очереди на обслуживание;
- « $S_4$ » - в отказе находится нерезервированный элемент и один из элементов дублированной пары. При этом восстановление происходит с приоритетом, обратным поступлению заявок, т.е. восстанавливается последний отказавший элемент – нерезервированный элемент (обратный приоритет обслуживания).

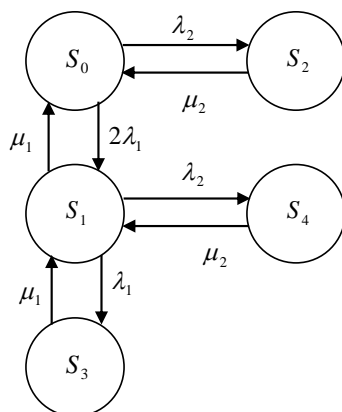


Рисунок 2.31 – Граф состояний системы (ветвям граф состояний приписаны интенсивности переходов, равные интенсивностям отказов и восстановлений элементов)

4. Составим систему дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0}{dt} = -(2\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t); \\ \frac{dP_1}{dt} = 2\lambda_1 P_0(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)P_1(t) + \mu_1 P_3(t) + \mu_2 P_4(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_0(t) - \mu_2 P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_1 P_1(t) - \mu_1 P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_2 P_1(t) - \mu_2 P_4(t). \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -(2\lambda_1 + \lambda_2)P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 = 0; \\ 2\lambda_1 P_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)P_1 + \mu_1 P_3 + \mu_2 P_4 = 0; \\ \lambda_2 P_0 - \mu_2 P_2 = 0; \\ \lambda_1 P_1 - \mu_1 P_3 = 0; \\ \lambda_2 P_1 - \mu_2 P_4 = 0. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = \frac{2\lambda_1 + \lambda_2}{\mu_1} P_0 - \frac{\mu_2}{\mu_1} P_2 = \frac{2\lambda_1}{\mu_1} P_0; \\ P_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} P_0; \\ P_3 = \frac{\lambda_1}{\mu_1} P_1 = \frac{2\lambda_1^2}{\mu_1^2} P_0; \\ P_4 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} P_1 = \frac{2\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \mu_2} P_0; \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1. \end{array} \right.$$

$$P_0 \left( 1 + \frac{2\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{2\lambda_1^2}{\mu_1^2} + \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\mu_1\mu_2} \right) = 1;$$

$$P_0 = \frac{\mu_1^2 \mu_2}{\mu_1^2 \mu_2 + 2\lambda_1 \mu_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1^2 + 2\lambda_1^2 \mu_2 + 2\lambda_1 \lambda_2 \mu_1};$$

$$P_1 = \frac{2\lambda_1 \mu_1 \mu_2}{\mu_1^2 \mu_2 + 2\lambda_1 \mu_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1^2 + 2\lambda_1^2 \mu_2 + 2\lambda_1 \lambda_2 \mu_1};$$

$$K_\Gamma = P_0 + P_1 = \frac{\mu_1^2 \mu_2 + 2\lambda_1 \mu_1 \mu_2}{\mu_1^2 \mu_2 + 2\lambda_1 \mu_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1^2 + 2\lambda_1^2 \mu_2 + 2\lambda_1 \lambda_2 \mu_1};$$

$$\bar{T}_0 = \frac{K_\Gamma}{\sum_{j \in S} P_j \sum_{i \in R} \mu_{ji}} = \frac{K_\Gamma}{P_2 \mu_2 + P_3 \mu_1 + P_4 \mu_2};$$

$$\bar{T}_B = \frac{1 - K_\Gamma}{K_\Gamma} \bar{T}_0.$$

### Вопросы для самоконтроля

1. В чём особенности марковского случайного процесса, на основе которого строится расчётная модель для восстанавливаемых объектов и систем?
2. Назовите основные этапы составления расчётной модели.
3. Поясните мнемоническое правило составления дифференциального уравнения вероятностей состояния (уравнение Колмогорова – Чепмена).
4. Дайте определение и поясните смысл показателей надёжности восстанавливаемых объектов и систем.
5. Каковы особенности применения метода дифференциальных уравнений для расчета надёжности невосстанавливаемых объектов?
6. На любом из примеров поясните связь графа состояний с логической структурой надёжности.

### Список литературных источников для самостоятельного изучения

1. Баруча-Рид А.Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
2. Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. Надёжность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.

## 2.6 Прогнозирование интенсивности отказов

### 2.6.1 Основные положения метода «Прогнозирование интенсивности отказов»

Прогнозирование интенсивности отказов является методом, который применяют главным образом на ранних стадиях проектирования для оценки интенсивности отказов оборудования и системы. Он может быть использован также на стадии производства при необходимости улучшения количества продукции. Для прогнозирования используют один из трех основных методов:

- метод прогнозирования интенсивности отказов в исходных условиях, называемый количественным анализом частей;
- метод прогнозирования интенсивности отказов в эксплуатационных режимах, называемый анализом напряжений частей;
- метод прогнозирования интенсивности отказов, использующий анализ подобия. Выбор метода зависит от объема имеющейся информации о системе, а также от необходимой точности аппроксимации.

**2.6.1.1. Прогнозирование интенсивности отказов в исходных условиях и прогнозирование интенсивности отказов в эксплуатационных режимах.** В этих случаях необходимо знать количество и тип компонентов, входящих в систему, а также параметры эксплуатационных режимов, для которых проводится прогнозирование интенсивности отказов. Если параметры эксплуатационных режимов для компонентов совпадают с параметрами исходных условий, то записи об эксплуатационных режимах не делают. Однако если параметры эксплуатационных режимов отличаются от параметров сходных условий, то принимают во внимание используемые условия и режимы для компонента (электрические, тепловые, окружающей среды и т.п.). Для этого должны быть использованы специально разработанные модели. Для точного прогноза необходима надежная база данных интенсивности отказов. В МЭК 61709 [5] даны рекомендации, как установить интенсивность отказов в исходных условиях (этот стандарт не содержит данных об интенсивности отказов). Необходимые вычисления могут занять много времени, поэтому рекомендуется применять соответствующие программные средства. Прогнозирование интенсивности отказов основано на следующих предположениях:

- компоненты соединены в системе последовательно (то есть отказ каждого компонента приводит к отказу системы);
- интенсивность отказов каждого компонента постоянна;
- отказы компонентов являются независимыми.

Эти предположения относительно исследуемой системы должны быть тщательно рассмотрены, так как ошибочное использование метода может привести к появлению опасных ошибок. Предположение, что интенсивности отказов компонентов являются постоянными, сокращает количество вычислений, так как в этом случае интенсивность отказов системы является суммой интенсивностей отказов компонентов. Интенсивность отказов системы



не всегда является значимой характеристикой надежности системы, поскольку не все отказы воздействуют на систему одинаково. Отказы диагностических элементов и некоторые режимы неисправностей могут не влиять на функционирование системы. В этом случае интенсивность отказов системы является лишь мерой количества корректирующих действий технического обслуживания, независимо от того, связаны они с отказами системы или нет. Точность прогноза характеристик надежности системы зависит от доступных моделей отказов компонентов. Все вышеуказанное относится также к прогнозированию интенсивности отказов в эксплуатационных режимах.

### **2.6.1.2. Прогнозирование интенсивности отказов методом подобия**

Метод основан на анализе подобия данных испытаний и данных с мест эксплуатации о безотказности изделий-аналогов (прототипов) для оценки безотказности разрабатываемого изделия.

Прогнозирование этим методом можно осуществлять на уровнях изделия в целом, его составных частей или компонентов с использованием тех же самых данных с мест эксплуатации, но с различными поправками с учетом отличий в условиях применения и нагрузок, особенностей конструкции, производства, технического обслуживания и ремонта, материалов и др.

Поэлементный анализ подобия (по составным частям, компонентам) используют в тех случаях, когда анализ подобия изделия в целом невозможен из-за недостаточного подобия с аналогом или неполноты данных об аналоге.

Анализ подобия включает сравнение характеристик вновь разработанного оборудования с характеристиками оборудования-прототипа. Сравнения характеристик аналогичного оборудования могут быть сделаны на уровне элемента, подсистемы или системы. При этом используют одни и те же данные эксплуатации, но применяют различные алгоритмы и расчетные коэффициенты, которые определяются следующими факторами:

- особенностями процессов разработки, производства и эксплуатации (технического обслуживания и ремонта);
- условиями эксплуатации и окружающей среды;
- свойствами материалов и комплектующих.

*Для каждого вышеупомянутого элемента необходимо сопоставлять все их характеристики. Например, условия эксплуатации и условия окружающей среды могут включать установившуюся температуру, влажность, температурные изменения, электрическую мощность, цикл режима работы, механическую вибрацию и т.д. Характеристики разрабатываемого оборудования могут отличаться количеством элементов (монтажных плат, соединений), схемами, размерами, массой, материалами и т.д.*

Анализ подобия включает необходимые алгоритмы или расчетные методы для определения количества подобий и различий между исследуемым оборудованием и оборудованием-прототипом.

*Анализ подобия элемента применяют в случае, когда оборудование-прототип имеет различия или недоступно для сравнения с вновь*

разработанным исследуемым оборудованием. Анализ подобия элемента – это структурированное сравнение элементов нового оборудования с подобными элементами ряда различных прототипов оборудования, для которых имеются данные по надежности.

### 2.6.2 Модели прогнозирования интенсивности отказов

Реальный уровень безотказности элементов зависит от коэффициентов их электрической нагрузки, определяемых отношением:

$$K_H = \frac{F_{РАБ}}{F_{НОМ}}, \quad (2.90)$$

где  $F_{РАБ}$  – электрическая нагрузка элемента в рабочем режиме, т.е. фактическая нагрузка на рассматриваемом схемном элементе;

$F_{НОМ}$  – номинальная или предельная по ТУ электрическая нагрузка элемента, выполняющего в конструкции функцию схемного элемента.

Недопустимо использовать элементы с коэффициентами электрической нагрузки  $K_H > 1$  даже по одному из параметров электрического режима. Считается, что оптимальное значение  $K_H \approx 0,2...0,6$ .

Примеры электрических характеристик, используемых для определения  $K_H$ , приведены в таблице 2.5.

Эксплуатационная интенсивность отказов:

$$\lambda_{\mathcal{E}} = \lambda_0 \prod_{i=1}^m K_i = \lambda_B \prod_{i=1}^m K_i; \quad (2.91)$$

$\lambda_0(\lambda_B)$  – справочная или базовая интенсивность отказов элементов данной группы;

$m$  – количество факторов, принятых во внимание из числа влияющих на безотказность элементов;

$K_i$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние  $i$ -го фактора.

$$\lambda_{\mathcal{E}} = \lambda_{B1} \prod_{i=1}^{m1} K_i^{(1)} + \dots + \lambda_{Bn} \prod_{i=1}^{mn} K_i^{(n)}; \quad (2.92)$$

$$\lambda_{PЭУ} = K_{Э.ОБ} \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} n_j; \quad (2.93)$$

$K_{Э.ОБ}$  – обобщенный эксплуатационный коэффициент;

$\lambda_0$  – среднegrупповое значение интенсивности отказов элементов  $j$ -й группы, найденное с использованием справочников,

$k$  – число сформированных групп однотипных элементов;

$n_j$  – количество элементов в  $j$ -й группе.

Таблица 2.5 – Электрические характеристики, используемые для определения уровня безотказности

Группа элементов	Характеристика F
Резисторы	Рассеиваемая мощность
Конденсаторы	Прикладываемое напряжение
Варикапы подстроечные. Транзисторы, транзисторные сборки. Диоды СВЧ	Рассеиваемая мощность
Диоды, кроме стабилитронов, диодные сборки	Средний прямой ток
Полупроводниковые (ПП) знакосинтезирующие индикаторы, оптопары, ПП излучатели	Средний прямой ток
Стабилитроны	Ток стабилизации, рассеиваемая мощность
Тиристоры	Средний прямой ток, рассеиваемая мощность
Трансформаторы	Мощность
Дроссели, катушки индуктивности	Ток подмагничивания или протекающий ток
Реле	Коммутируемый ток
Соединители (разъёмы), элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.)	Протекающий ток
Кабели, шнуры, монтажные провода	Плотность тока в проводе

Таблица 2.6 – Вид РЭУ и соответствующий им уровень безотказности

Вид РЭУ и условия эксплуатации	$K_{э.об}$
Лабораторные условия	1,0
Помещения с регулируемой температурой и влажностью	1,1
Космос (на орбите)	1,5
Наземные стационарные условия	2...4,7 (2,5)
Наземные возимые РЭУ	4...7 (5,0)
Наземные подвижные (переносимые) РЭУ	7...15 (7,0)
Морские защищённые условия	7...12 (7,6)
Морские незащищённые условия	7...15 (10,0)
Бортовые самолётные РЭУ	5...10 (7,0)
Запуск ракеты	10...44 (20,0)

## 2.7 Анализ видов, последствий и критичности отказов

### 2.7.1 Основные положения анализа видов, последствий и критичности отказов

Метод анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО) нашел широкое применение в практике анализа надежности сложных систем с высокой ценой отказа, наряду с этим данный метод достаточно широко применяется при анализе безопасности и риска потенциально опасных систем и модификации опасных производств [16].

Основы применения метода изложены в [26, 30].

В АВПКО используются следующие понятия:

**Тяжесть последствий отказа** – качественная или количественная оценка вероятного (наблюдаемого) ущерба от отказа элемента и (или) системы.

**Категория тяжести последствий отказов** – классификационная группа отказов по тяжести их последствий, характеризующаяся определенным, установленным до проведения анализа сочетанием качественных и (или) количественных учитываемых составляющих ожидаемого (вероятного) отказа или нанесенного отказом ущерба.

**Критический отказ** – отказ системы или ее элемента, тяжесть последствий которого в пределах данного анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности данного отказа и/или возможного ущерба, связанного с его возникновением.

**Критичный элемент** – элемент системы, отказ которого может быть критическим. В процессе АВПКО конкретного изделия могут быть установлены иные признаки для отнесения элементов к категории критичных, например критичным может быть элемент, отказ которого безусловно ведет к полному отказу системы, независимо от тяжести его последствий.

**Критичный технологический процесс** – технологический процесс (ТП), применяемый при изготовлении и/или монтаже системы или ее элементов, нарушение параметров которого или вносимые в ходе которого дефекты могут быть причиной критического отказа. При АВПКО конкретного изделия могут быть установлены иные признаки критичности ТП, например критичным может быть признан техпроцесс, влияние которого на надежность системы или ее элементов неизвестно или недостаточно изучено.

**Показатель критичности отказа** – количественная характеристика критичности отказа, учитывающая его вероятность за время эксплуатации и тяжесть возможных последствий.

**Анализ видов и последствий отказов (АВПО)** – формализованная, контролируемая процедура качественного анализа проекта, технологии изготовления, правил эксплуатации и хранения, системы технического обслуживания и ремонта изделия, заключающаяся в выделении на некотором уровне разукрупнения его структуры возможных (наблюдаемых) отказов разного вида, в прослеживании причинно-следственных связей,

обусловливающих их возникновение, и возможных (наблюдаемых) последствий этих отказов на данном и вышестоящих уровнях, а также - в качественной оценке и ранжировании отказов по тяжести их последствий.

**Анализ видов, последствий и критичности отказов** – процедура АВПО, дополненная оценками показателей критичности анализируемых отказов

**2.7.1.1 Цели проведения АВПКО.** АВПКО проводят с целью обоснования, проверки достаточности, оценки эффективности и контроля за реализацией управляющих решений, направленных на совершенствование конструкции, технологии изготовления, правил эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта объекта и обеспечивающих предупреждение возникновения и/или ослабление тяжести возможных последствий его отказов, достижение требуемых характеристик безопасности, экологичности, эффективности и надежности.

**2.7.1.2 Задачи, решаемые при проведении АВПКО.** В процессе АВПКО решают следующие задачи:

- 1) выявляют возможные виды отказов составных частей и изделия в целом, изучают их причины, механизмы и условия возникновения и развития;
- 2) определяют возможные неблагоприятные последствия возникновения выявленных отказов, проводят качественный анализ тяжести последствий отказов и/или количественную оценку их критичности;
- 3) составляют и периодически корректируют перечни критичных элементов и технологических процессов;
- 4) оценивают достаточность предусмотренных средств и методов контроля работоспособности и диагностирования изделий для своевременного обнаружения и локализации его отказов, обосновывают необходимость введения дополнительных средств и методов сигнализации, контроля и диагностирования;
- 5) вырабатывают предложения и рекомендации по внесению изменений в конструкцию и (или) технологию изготовления изделия и его составных частей, направленные на снижение вероятности и (или) тяжести последствий отказов, оценивают эффективность ранее проведенных доработок;
- 6) оценивают достаточность предусмотренных в системе технологического обслуживания контрольно-диагностических и профилактических операций, направленных на предупреждение отказов изделий в эксплуатации, вырабатывают предложения по корректировке методов и периодичности технического обслуживания;
- 7) анализируют правила поведения персонала в аварийных ситуациях, обусловленных возможными отказами изделий, предусмотренные эксплуатационной документацией, вырабатывают предложения по их совершенствованию или внесению соответствующих изменений в эксплуатационную документацию при их отсутствии;

8) проводят анализ возможных (наблюдаемых) ошибок персонала при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте изделий, оценивают их возможные последствия, вырабатывают предложения по совершенствованию человеко-машинных интерфейсов и введению дополнительных средств защиты изделий от ошибок персонала, по совершенствованию инструкций по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту изделий.

Проведение АВПКО не отменяет необходимости выполнения расчетов надежности объекта в соответствии с общими требованиями [26]. Планирование и выполнение расчетов надежности и АВПКО должны осуществляться так, чтобы указанные элементы ПОН дополняли друг друга и взаимно служили источниками исходных данных. При этом по результатам АВПКО уточняют критерии отказов объекта, модели, применяемые при расчете его надежности, задачи и содержание технического обслуживания и ремонта объекта, а методы и результаты расчетов надежности используют для оценки вероятностей отказов объекта, учитываемых при анализе их критичности.

#### **2.7.1.3 АВПКО обеспечивает получение исходных данных для:**

- 1) планирования экспериментальной отработки объектов;
- 2) уточнения распределения требований надежности между составными частями объекта, внесения соответствующих изменений и дополнений в ПОН составных частей;
- 3) установления и уточнения требований по приспособленности объекта к диагностированию (контролепригодности) и его ремонтпригодности;
- 4) отработки (совершенствования) технологии изготовления объекта, включая планирование программы отбраковочных испытаний объекта и его составных частей в процессе производства;
- 5) планирования системы технического обслуживания и ремонта объекта, отработки эксплуатационной и ремонтной документации;
- 6) составления (совершенствования) программ обучения и тренировки эксплуатационного и ремонтного персонала, правил его поведения в аварийных ситуациях.

#### **2.7.1.4 Использование результатов АВПКО.**

Результаты АВПКО учитывают:

- 1) при принятии решений о завершенности этапов видов работ на стадиях жизненного цикла объектов, включая приемку опытно-конструкторских работ по разработке объектов;
- 2) при сертификации объектов для проверки достаточности принятых при их разработке и изготовлении мер по обеспечению безопасности.

### 2.7.2 Основные принципы АВПКО

АВПКО в общем случае представляет сочетание качественного анализа видов и последствий отказов объекта с количественными оценками критичности, выявляемых при АВПО возможных или наблюдаемых при испытаниях и в эксплуатации отказов. В процессе АВПО проводят предварительную количественную оценку и ранжирование выявленных возможных (наблюдаемых) отказов объектов по тяжести их последствий с целью определения необходимости дальнейшего углубленного анализа и оценки их критичности и очередности проведения соответствующих доработок объекта, технологии его изготовления, системы технического обслуживания и ремонта. Для обеспечения объективности и сопоставимости качественных оценок последствий отказов до проведения АВПКО объекта должна быть выработана система классификации отказов по категориям тяжести их возможных последствий. Указанная система может быть выработана применительно к конкретному объекту и приведена в методике его АВПО либо установлена в соответствующем нормативном документе, распространяющемся на группу (вид, тип) объектов.

При категорировании отказов по тяжести их последствий должны учитываться, по крайней мере, следующие факторы в различных сочетаниях:

1) опасность отказа (с учетом немедленных и отдаленных последствий) для жизни и здоровья людей (в том числе не связанных непосредственно с эксплуатацией объекта), для окружающей среды, для целостности и сохранности самого объекта, другого имущества и материальных объектов;

2) влияние отказа на качество функционирования объекта и полноту выполнения им назначенных функций, возможный ущерб любого вида (материальный, моральный, политический и др.), обусловленный снижением качества функционирования объекта или невыполнением объектом определенных функций (поставленных задач);

3) скорость развития неблагоприятных последствий отказа, определяющая возможность принятия соответствующих мер защиты от них.

Пример возможной классификации отказов с учетом перечисленных факторов приведен в табл. 2.7.

При АВПО может проводиться предварительная качественная оценка ожидаемой (наблюдаемой) частоты наступления отказов разных категорий тяжести при эксплуатации объектов. Указанные оценки используют:

1) для ранжирования отказов по очередности необходимых доработок объекта с целью их предупреждения с использованием матриц «вероятность отказа - тяжесть последствий» (табл. 2.8);

2) для построения шкал балльных оценок критичности отказов (табл. 2.9).

Критичность отказов при АВПКО оценивают с использованием показателей, учитывающих для каждого анализируемого отказа объекта:

- вероятность его возникновения за время эксплуатации;

– условные вероятности наступления всех возможных неблагоприятных последствий отказа, если он может сопровождаться несколькими различными по характеру и тяжести последствиями;

– размер возможного ущерба в результате наступления каждого из ожидаемых последствий отказов.

Таблица 2.7 – Пример шкалы для установления категории тяжести последствий отказов

Категория тяжести последствий отказов	Характеристика тяжести последствий отказов
IV	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей, срыв выполнения поставленной задачи
III	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или для окружающей среды, срыв выполняемой задачи, но создает пренебрежимо малую угрозу жизни и здоровью людей
II	Отказ, который может повлечь задержку выполнения задачи, снижение готовности и эффективности объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей
I	Отказ, который может повлечь снижение качества функционирования объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей

Таблица 2.8 – Матрица «вероятность отказа - тяжесть последствий» для ранжирования отказов при АВПЮ

Ожидаемая частота возникновения отказов	Тяжесть последствий			
	Катастрофический отказ (категория IV)	Критический отказ (категория III)	Некритический отказ (категория II)	Отказ с пренебрежимо малыми последствиями (категория I)
Частый отказ	A	A	A	C
Вероятный отказ	A	A	B	C
Возможный отказ	A	B	B	D
Редкий отказ	A	B	C	D
Практически невероятный отказ	B	C	C	D

*Ранги отказов:*

*A - обязателен углубленный количественный анализ критичности,*

*B - желателен количественный анализ критичности,*

*C - можно ограничиться качественным анализом,*

*D - анализ не требуется*



Таблица 2.9 – Качественные оценки частоты отказов

Виды отказов по частоте	Качественное описание частоты для	
	индивидуального изделия	совокупности изделий
Частый отказ	Вероятно частое возникновение	Наблюдается постоянно
Вероятный отказ	Будет наблюдаться несколько раз за срок службы изделия	Вероятно частое возникновение
Возможный отказ	Возможно одно наблюдение данного отказа за срок службы	Наблюдается несколько раз
Редкий отказ	Отказ маловероятен, но возможен хотя бы раз за срок службы	Вполне возможен хотя бы один раз
Практически невероятный отказ	Отказ настолько маловероятен, что вряд ли будет наблюдаться даже один раз за срок службы	Отказ маловероятен, но возможен хотя бы один раз

В общем случае показатель критичности отказа представляет произведение его вероятности на средневзвешенный по условным вероятностям проявления последствий отказа размер ущерба от него, хотя возможно применение иных способов измерения критичности отказов.

Значения вероятностей отказов, учитываемые при оценке их критичности, рассчитывают (прогнозируют) принятыми в расчетах надежности методами с учетом структуры объекта, уровней нагруженности и режимов работы его элементов по имеющимся справочным или экспериментальным данным об их надежности. Возможные последствия каждого отказа определяют по результатам АВПО объекта, а соответствующие условные вероятности наступления каждого последствия рассчитывают на основе моделей типа «дерева событий» или прогнозируют экспертными методами.

Для определения возможного ущерба от наступления определенных последствий каждого отказа в АВПКО применяют:

- относительные балльные оценки с использованием соответствующей шкалы, разработанной применительно к конкретному объекту и установленной в методике его АВПКО, либо содержащейся в соответствующем нормативном документе по АВПКО группы (вида, типа) объектов;

- показатели, представляющие числовые характеристики соответствующих функций потерь, например распределения ущерба от отказов в денежном или ином натуральном выражении, и оцениваемые методами прогнозирования по априорным данным или путем моделирования возникающих в результате отказа аварийных ситуаций (пожаров, взрывов, выбросов отравляющих или радиоактивных веществ и др.).

Балльные оценки возможного ущерба от отказов применяют для объектов, абсолютные оценки последствий отказов которых невозможны или нецелесообразны по этическим, техническим или экономическим соображениям. Критичность отказа  $C$  рассчитывают как произведение  $C = B1 \cdot B2 \cdot B3$ , входящие в которое сомножители оценивают в баллах с использованием таблиц 2.10 – 2.12.

Таблица 2.10 – Оценки вероятностей отказов в баллах

Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов, оцененная расчетом или экспериментальным путем	Оценка вероятности отказа в баллах <i>B1</i>
Отказ практически невероятен	Менее 0,00005	1
Отказ маловероятен	От 0,00005 до 0,001	2
Отказ имеет малую вероятность, обусловленную только точностью расчета	От 0,001 до 0,005	3
Умеренная вероятность отказа	От 0,005 до 0,01	4
Отказы возможны, но при испытаниях или в эксплуатации аналогичных изделий не наблюдались	От 0,001 до 0,005	5
Отказы возможны, наблюдались при испытаниях и в эксплуатации аналогичных изделий	От 0,001 до 0,005	6
Отказы вполне вероятны	От 0,005 до 0,01	7
Высокая вероятность отказов	От 0,01 до 0,10	8
Вероятны повторные отказы	Более 0,11	10

Таблица 2.11 – Оценки последствий отказов

Описание последствий отказов	Оценка последствий в баллах <i>B2</i>
Отказ не приводит к заметным последствиям, потребитель, вероятно, не обнаружит наличие неисправности	1
Последствия отказа незначительны, но потребитель может выразить неудовольствие его появлением	2-3
Отказ приводит к заметному для потребителя снижению эксплуатационных характеристик и/или к неудобству применения изделия	4-6
Высокая степень недовольства потребителя, изделие не может быть использовано по назначению, но угрозы безопасности отказ не представляет	7-8
Отказ представляет угрозу безопасности людей или окружающей среды	9-10

Таблица 2.12 – Оценка вероятности обнаружения отказа до поставки изделия потребителю

Виды отказов по вероятности обнаружения до поставки	Вероятность обнаружения отказа, оцененная расчетным или экспертным путем	Оценка вероятности в баллах ВЗ
Очень высокая вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	Более 0,95	1
Высокая вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	От 0,95 до 0,85	2-3
Умеренная вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	От 0,85 до 0,45	4-6
Высокая вероятность поставки потребителю дефектного изделия	От 0,45 до 0,25	7-8
Очень высокая вероятность поставки потребителю дефектного изделия	Менее 0,25	9-10

### 2.7.3. Порядок АВПКО

Необходимость проведения АВПКО конкретного объекта определяют по согласованию заинтересованных сторон при выработке требований к программе обеспечения его надежности, включаемых в контрактные документы (техническое задание, договор и др.).

Рекомендуется предусматривать проведение АВПКО для объектов:

- у которых возможны отказы, представляющие угрозу безопасности людей, опасного загрязнения окружающей среды, значительного экономического или иного ущерба;

- прямое экспериментальное подтверждение соответствия которых установленным требованиям безопасности и надежности технически невозможно или экономически нецелесообразно и проводится расчетными или расчетно-экспериментальными методами;

- являющихся объектами обязательной или добровольной сертификации.

Проведение АВПКО должно быть обязательным в случае, когда отсутствуют исходные данные для применения иных методов анализа надежности объекта (расчетных и др.) или их объем и/или достоверность на рассматриваемом этапе жизненного цикла объекта признаны недостаточными.

АВПКО не проводят, если цели и задачи анализа, сформулированные в настоящем стандарте, могут быть достигнуты (решены) другими методами, например, если при расчете надежности изучают и учитывают возможные виды отказов объекта, их последствия и критичность.

АВПКО проводят в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2.32.

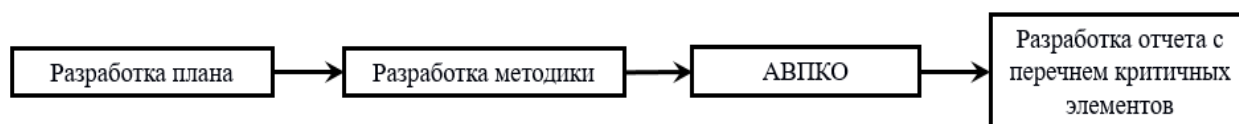


Рисунок 2.32 – Алгоритм проведения АВПКО

**2.7.3.1 План АВПКО.** АВПКО проводят по плану, непосредственно включаемому в ПОН или оформленному в виде самостоятельного документа, прилагаемого к ПОН. План проведения АВПКО должен устанавливать:

1) стадии жизненного цикла объекта и соответствующие им этапы видов работ, на которых проводят анализ (в дальнейшем - этапы анализа или этапы);

2) виды и методы анализа на каждом этапе со ссылками на соответствующие нормативные документы и методики. При отсутствии необходимых документов план должен предусматривать разработку соответствующих методик АВПКО (АВПО) рассматриваемого объекта;

3) уровни разукрупнения объекта, начиная с которого (до которого) проводят анализ на каждом этапе;

4) сроки проведения анализа на каждом этапе, распределение ответственности за его проведение и реализацию результатов, сроки, формы и правила отчетности по результатам анализа;

5) порядок контроля за проведением и реализацией результатов анализа со стороны руководства организации-разработчика и заказчика (потребителя).

План АВПКО должен обеспечивать взаимную увязку и согласование ПОН объекта по срокам представления, составу и содержанию необходимых исходных данных и результатов с программами обеспечения других составляющих его качества (программой обеспечения безопасности, программой эргономического обеспечения и др.).

Анализ начинают с возможно более ранних этапов разработки объекта и систематически повторяют на последующих этапах по мере отработки конструкции и технологии изготовления объекта, накопления исходных данных для анализа. При проведении АВПКО на последующих этапах разработки должна быть предусмотрена проверка полноты реализации и эффективности мероприятий по доработкам, рекомендованных на предыдущих этапах.

На всех этапах анализ начинают с проведения АВПО объекта, по результатам которого принимают решения о необходимости углубленного количественного анализа и оценки критичности отдельных видов отказов.

Уровень разукрупнения объекта, начиная с которого (до которого) проводят АВПКО (АВПО) на определенном этапе его разработки, устанавливают, исходя из: требуемых результатов анализа; степени отработанности конструкторской, технологической и эксплуатационной документации; наличия необходимых исходных данных; степени новизны конструкции объекта и его составных частей, технологий их изготовления, условий эксплуатации.

При прочих равных условиях, чем выше уровень отработанности конструкции и технологии изготовления объекта и его составных частей, тем меньший уровень детализации допускается при анализе, и, наоборот, объекты, содержащие принципиально новые конструктивно-технологические решения, построенные на новой элементной базе, требуют углубленного, более детализированного анализа.

Для обеспечения полноты и объективности анализа возможные виды отказов составных частей и объекта в целом при АВПКО (АВПО) целесообразно первоначально устанавливать на основе существующих для объекта данного вида классификаторов отказов и неисправностей, дополняя их при необходимости видами отказов, специфичными для рассматриваемого объекта.

**2.7.3.2. Требования к методике анализа.** Методика АВПО (АВПКО) должна содержать:

- общую схему (алгоритм) анализа;
- формы и правила заполнения рабочих листов, применяемых при анализе;
- систему классификации отказов объекта по тяжести их возможных последствий или ссылке на соответствующий нормативный документ (при проведении АВПО);
- систему кодирования элементов, функций и видов отказов;
- показатели критичности отказов, методы оценки величин, входящих в расчетные выражения для указанных показателей;
- программные средства, применяемые при анализе, указания по их использованию, составу и содержанию вводимых данных;
- источники информации (или непосредственно сами данные), используемой при анализе и расчетах показателей критичности, требования к точности и достоверности используемых данных;
- требования к содержанию и оформлению отчетов по результатам анализа;
- требования к формам, правила составления и порядок ведения перечней критичных элементов и технологических процессов.

По результатам АВПО (АВПКО), проведенного на каждом этапе разработки, предусмотренном планом, должен быть составлен отчет, содержащий:

- формализованное описание объекта для целей анализа с указанием уровня его разукрупнения, до которого (или начиная с которого) выполнялся анализ;
- описание метода и алгоритма анализа;
- заполненные рабочие листы, применявшиеся при анализе;
- сводные результаты анализа, включающие: перечень и классификацию возможных отказов объекта по видам, причинам и условиям

возникновения, последствиям и критичности; перечни критичных элементов и технологических процессов изготовления;

- заключение о возможности перехода к следующему этапу разработки объекта или предложения по кардинальной переработке проекта, если выявленные недостатки не могут быть устранены на последующих этапах.

В отчете также приводят предложения и рекомендации, реализуемые на последующих этапах разработки и касающиеся:

- внесения изменений в конструкцию и алгоритмы функционирования объекта, направленных на снижение вероятности выявленных отказов до приемлемого уровня, или/и на повышение устойчивости функционирования объекта в случае их возникновения, или на введение защиты от наиболее тяжелых последствий отказов;

- замены применяемых материалов и комплектующих изделий;

- направлений и задач экспериментальной отработки объекта, особенно в части отработки на надежность критичных элементов, проверки полноты выявления всех видов конструкционных отказов, проверки результативности внесенных изменений в конструкцию;

- изменения (введения дополнительных) средств контроля, диагностирования и индикации отказов, регламентов проверки технического состояния и технического обслуживания объектов в эксплуатации;

- введения в технологию изготовления объекта специальных мер по предупреждению, выявлению и устранению дефектов критичных элементов (повышение стабильности техпроцессов, введение дополнительных контрольных процедур, ужесточение программ отбраковки скрытых дефектов и т.п.);

- внесения в инструкции по эксплуатации соответствующих правил поведения обслуживающего персонала при возникновении критических или катастрофических отказов, нацеленных на минимизацию их последствий.

**2.7.3.3 Перечни критичных элементов (технологических процессов).** Перечни критичных элементов (технологических процессов) составляют после завершения анализа на первом этапе разработки объекта, предусмотренном планом АВПКО, систематически корректируют на последующих этапах путем исключения элементов (процессов), эффективность доработок по которым подтверждена соответствующим анализом, расчетами, экспериментальными данными, и включения в перечень вновь выявленных критичных элементов (процессов).

Перечни критичных элементов (техпроцессов) утверждает руководитель разработки по согласованию с заказчиком (потребителем), принимающий решения о любых корректировках перечней и возможности перехода к последующему этапу видов работ на стадиях жизненного цикла объекта при текущем состоянии указанных перечней.

В перечни критичных элементов включают:

- элементы, возможная тяжесть последствий отказов которых, оцениваемая качественно или количественно, превосходит допустимый для рассматриваемого объекта уровень;
- элементы, отказы которых неизбежно вызывают полный отказ объекта;
- элементы с ограниченным сроком службы (ресурсом), не обеспечивающим требуемой долговечности объекта;
- элементы, по которым в момент проведения анализа отсутствуют достоверные данные о их качестве и надежности в рассматриваемых условиях применения и (или) возможных последствиях их отказов.

В перечень критичных техпроцессов включают:

- технологические процессы, влияние которых на качество и надежность объекта и его элементов в момент проведения анализа неизвестно или недостаточно изучено.
- Для каждого элемента, включенного в перечень критичных элементов, должны быть указаны:
  - кодовое обозначение и ссылка на соответствующий рабочий лист АВПКО;
  - причины включения в перечень (категория тяжести последствий или значение показателя критичности отказов, другие признаки критичности);
  - описание возможных причин и последствий отказов;
  - предлагаемые конструктивно-технологические и/или эксплуатационные меры по минимизации вероятности отказов или по снижению возможной тяжести их последствий;
  - предложения по повышению устойчивости объекта к данному виду отказов;
  - предложения по проведению дополнительных исследований и испытаний с целью отработки данного элемента и/или получения необходимых данных по его надежности в рассматриваемых условиях применения.

#### **2.7.4 Методы АВПКО**

АВПО (АВПКО) проводят одним из следующих методов:

- структурным;
- функциональным;
- комбинированным.

**2.7.4.1. Структурные методы.** Структурные методы АВПО (АВПКО) относят к классу индуктивных методов (анализ «снизу вверх»), применяемых для относительно простых объектов, отказы которых могут быть четко локализованы, а последствия каждого отказа элементов выбранного начального уровня разукрупнения могут быть прослежены на всех вышестоящих уровнях структуры объекта.

Общая схема (алгоритм) АВПО (АВПКО) структурным методом включает следующие основные операции:

1) в соответствии с планом анализа устанавливают минимальный уровень разукрупнения, с которого начинают АВПО;

2) на основе функциональной блок-схемы объекта идентифицируют все элементы выбранного уровня разукрупнения;

3) для каждого идентифицированного элемента данного уровня на основе имеющихся классификаторов отказов, инженерного анализа, имеющихся априорных данных, опыта и знаний исследователя составляют перечень возможных видов отказов данного элемента;

4) для каждого вида отказов выбранного элемента определяют его возможные последствия на рассматриваемом и следующих уровнях структуры объекта;

5) для элементов, отказы которых определенного вида непосредственно приводят к отказу объекта или снижению качества его функционирования, оценивают категорию тяжести последствий отказов (при АВПО) или рассчитывают показатели критичности (при АВПКО);

6) повторяют описанные выше операции последовательно для элементов всех вышестоящих уровней разукрупнения. Последствия отказов элементов нижестоящего уровня, которые не могут быть выражены в виде влияния на функционирование элементов рассматриваемого уровня, рассматривают как самостоятельные виды отказов на этом уровне;

7) выделяют отказы, категория тяжести последствий или оценки показателей критичности, которых превосходят пределы, установленные планом анализа, а элементы, соответствующие этим отказам, включают в перечень критичных элементов.

Для каждого критичного элемента определяют:

1) наличие и оценивают достаточность предусмотренных средств и методов обнаружения, локализации и индикации отказов;

2) возможные меры, обеспечивающие сохранение работоспособности объекта при возникновении данного отказа (введение резервирования, перестраиваемая структура, изменение алгоритма функционирования) и оценивают целесообразность их введения;

3) возможные меры по снижению вероятности отказов (применение в облегченном режиме, введение защиты от перегрузок, дополнительных проверок и испытаний в процессе изготовления и эксплуатации, введение профилактического обслуживания и плановых замен в эксплуатации и т.п.) и оценивают их эффективность;

4) возможные способы предупреждения наиболее опасных последствий отказов (аварийная защита и сигнализация, специальные правила поведения персонала при возникновении отказов и т.п.).

При углубленном анализе возможно рассмотрение на каждом уровне разукрупнения комбинаций отказов двух и более элементов.



**2.7.4.2. Функциональные методы.** Функциональные методы АВПО (АВПКО) относят к классу дедуктивных (анализ по схеме «сверху вниз») методов, применяемых для сложных многофункциональных объектов, отказы которых трудно априорно локализовать и для которых характерны сложные зависимые отказы.

Общая схема (алгоритм) АВПО (АВПКО) функциональным методом включает следующие операции:

- 1) идентифицируют все функции, выполняемые объектом;
- 2) для каждой функции на основе априорных данных, опыта исследователя, инженерного анализа и другими доступными способами определяют перечень возможных нарушений (отклонений) данной функции;
- 3) для каждого нарушения функции оценивают качественно тяжесть возможных последствий этого нарушения (через АВПО) или количественно - ожидаемый ущерб (при АВПКО);
- 4) выделяют критические нарушения функции, тяжесть возможных последствий которых или ущерб от которых превосходит пределы, установленные планом анализа;
- 5) для каждого выделенного критического нарушения, принимая его возникновение в качестве «вершинного события», строят дерево отказов, охватывающее отказы элементов всех уровней разукрупнения, вплоть до нижнего уровня, установленного планом анализа;
- 6) с помощью построенного дерева выделяют одиночные элементы, приводящие к критическому нарушению функций изделия, и сочетания элементов, совместные отказы которых ведут к указанному нарушению;
- 7) оценивают вероятности отказов одиночных элементов и вероятности выделенных комбинаций отказов элементов, с использованием которых при проведении АВПКО рассчитывают показатели критичности соответствующих отказов (сочетаний отказов);
- 8) составляют перечни критичных элементов.

**2.7.4.3. Комбинированные методы.** Для сложных объектов АВПКО (АВПО) проводят, как правило, комбинированными методами, сочетающими элементы структурных и функциональных методов.

Независимо от применяемого метода АВПО (АВПКО) в качестве первого этапа анализа включают:

- 1) составление перечня и описаний всех задач, выполняемых объектом в эксплуатации, и необходимых для реализации каждой задачи рабочих функций объекта в целом и его элементов вплоть до установленного для данного этапа анализа или предельно возможного уровня разукрупнения. При этом идентифицируют все элементы заданного и вышестоящего уровней, участвующие в выполнении каждой функции объекта;
- 2) кодирование каждой функции и элементов объектов в соответствии с установленной системой кодирования;
- 3) описание режимов и условий выполнения каждой задачи в виде временных диаграмм и циклограмм нагружения объекта и его элементов;

4) составление функциональной блок-схемы объекта и структурной схемы его надежности.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое последовательная система и в чем состоит условие её безотказной работы?
2. Как рассчитывается вероятность безотказной работы систем с последовательным соединением элементов?
3. Как можно повысить надёжность систем с последовательным соединением элементов?
4. Как определяются такие показатели безотказности системы с последовательным соединением элементов, как вероятность безотказной работы и интенсивность отказов?
5. Какой закон распределения наработки до отказа будет иметь система с последовательным соединением элементов, если законы распределения наработки до отказа элементов являются экспоненциальными?
6. Правило применения логического знака И.
7. Правило применения логического знака ИЛИ.
8. Дайте определение дерева отказов.
9. Каковы способы соединения элементов между собой и их обозначения?
10. Перечислите виды отказов.
11. Какие знаки используют для обозначения взаимосвязи событий?

### Список литературных источников для самостоятельного изучения

1. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
2. Половко А.М., Гуров С.В.: Основы теории надежности. - 2 изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
3. Колмогоров А.Н., Драгалин А.Г. Математическая логика.// Изд. 3-е, стереотипное – М.: Ком. Книга, 2006. – 240 с.
4. Гихман И.И., Скороход А.В. Введение в теорию случайных процессов. – М.: Наука, 1977. –568 с.

### 3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

#### 3.1 Обеспечение надежности систем при их разработке, производстве и эксплуатации

Проблема надежности – комплексная проблема. Решение ее зависит не только от того, насколько глубоко разработана теория надежности и инженерные методы исследований надежности систем, но также и от того, насколько удачно решены вопросы по ее обеспечению.

Как отмечалось ранее, под *обеспечением надежности* системы следует понимать совокупность организационно-технических и научно-методических мероприятий, направленных на достижение и поддержание заданного уровня надежности на всех этапах жизненного цикла, при этом:

- при разработке и производстве данные мероприятия должны быть направлены на обоснование номенклатуры и задание необходимых уровней количественных и качественных требований к показателям надежности систем, повышение достигнутого уровня или достижение заданного;
- при эксплуатации – на поддержание, а при необходимости восстановление, заданного уровня надежности.

Основные фазы создания, использования и развития системы в рамках жизненного цикла представлены на рис. 3.1.

Прежде чем перейти к рассмотрению основных направлений и путей обеспечения надежности систем, следует остановиться на факторах, влияющих на надежность.

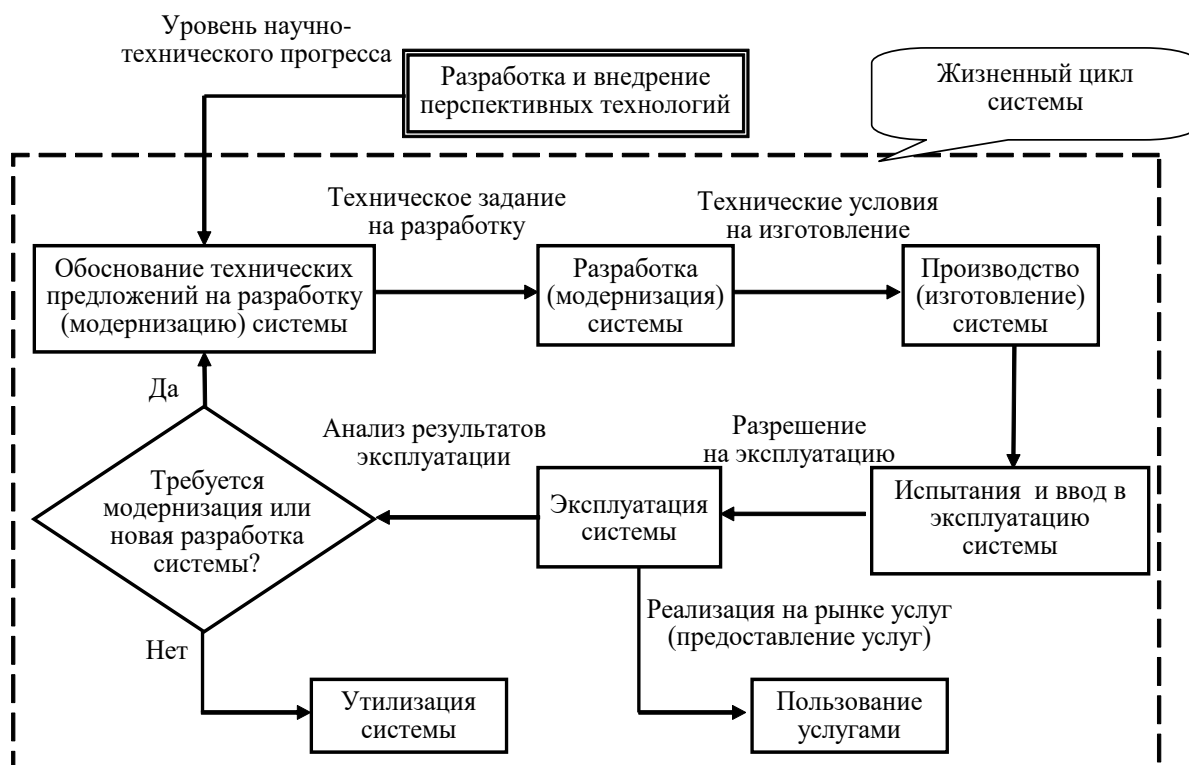


Рисунок 3.1 – Жизненный цикл системы

### 3.1.1 Факторы, влияющие на надежность систем

Все множество факторов, действующих на систему и тем самым определяющих ее надежность, классифицируют по этапам жизненного цикла объекта (рис. 3.2).

При этом, по характеру воздействия факторы подразделяют на объективные, отражающие воздействие внешней среды, и субъективные – отражающие воздействия обслуживающего персонала.



Рисунок 3.2 – Факторы, влияющие на надежность

**Конструкционные факторы** непосредственно связаны с действиями конструкторов в процессе проектирования и конструирования систем, ведь именно они разрабатывают структурную, функциональную, принципиальную и др. схемы системы, рассчитывают (выбирают) материалы и элементы системы, разрабатывают технологию изготовления системы и ее элементов, а также и систему эксплуатации и т.д.

При проектировании системы выбирается принцип ее работы и структура. Осуществляется конструктивная разработка отдельных узлов и приборов. Если на стадии проектирования не будут учитываться данные факторы, связанные с надежностью системы, и тем более, если будут допущены неточности в проектировании, то обеспечить надежность системы за счет мер, принимаемых на двух последующих этапах (производстве и эксплуатации), весьма трудно. Это потребует больших материальных затрат, а в некоторых случаях даже практически невозможно. На этом этапе главное внимание должно быть обращено на выбор наиболее простой системы, имеющей по возможности наименьшее число элементов и связей между ними. Это требование подтверждается тем, что в нерезервированных системах вероятность отказа системы в первом приближении пропорциональна количеству элементов. Наряду с выбором простой схемы, оцениваемой приближенно по количеству элементов, большое влияние на надежность системы имеет выбор стабильной схемы. В стабильной по принципу действия схеме обычно наблюдаются минимальные связи между параметрами отдельных элементов, а также обеспечивается минимальное влияние отклонений параметров элементов на величину ошибки в выходной величине системы. Таким образом, выбор простой и стабильной по принципу действия схемы является одной из главных мер обеспечения высокой надежности системы, как при внезапных, так и при постепенных отказах. Еще большие возможности

повышения надежности могут представиться в результате применения самоорганизующихся систем, в которых при отказах отдельных элементов или изменении внешних условий изменяется структура системы, перераспределяются функции между ее отдельными элементами.

Вероятность отказа нерезервированной системы в первом приближении равна сумме вероятностей отказов элементов. Следовательно, безотказность нерезервированных систем зависит не только от количества элементов, но и от безотказности элементов и режимов их работы. Для обеспечения высокой безотказности (низкой интенсивности отказов) при проектировании системы надо выбирать наиболее качественные и перспективные элементы. Поэтому при проектировании для повышения безотказности системы режимы работы элементов нужно выбирать значительно меньшими, чем номинальные, при этом степень уменьшения нагрузок зависит от конкретных задач.

Большое влияние на безотказность системы оказывают условия ее работы, а именно: воздействующие на систему и элементы механические, климатические и др. нагрузки. При проектировании системы необходимо максимально уменьшить влияние внешних и внутренних нагрузок на систему и ее элементы. Эта задача в основном решается правильным выбором конструкции узлов, приборов и системы в целом. В качестве дополнительных конструктивных мер, обеспечивающих повышение безотказности, можно указать на методы снижения влияния механических нагрузок путем применения специальных конструктивных форм устройств, амортизаторов и т.д. Влияние климатических нагрузок может быть в значительной степени ослаблено при правильном конструктивном оформлении узлов и блоков, например, с таким расчетом, чтобы обеспечить повышенную теплоотдачу (искусственное охлаждение), защиту от влаги (герметизация). Немаловажную роль играет и выбор материалов, которые должны обладать требуемыми физико-механическими, прочностными и др. характеристиками.

При разработке схемы и конструкции должны также быть предусмотрены меры, позволяющие обеспечить надежность системы при эксплуатации, а именно: блочная конструкция системы, применение стандартных и унифицированных узлов и блоков, удобство проверок, ТО и ремонта и др.

К **производственным факторам** следует отнести факторы, обусловленные организацией технологического процесса производства системы и ее элементов, а также процесса технического контроля. Соблюдение установленных технологических процессов должно начинаться с входного контроля материалов и изделий, применяемых в системе, обеспечении при необходимости качественной замены материалов. В ряде случаев причиной низкой надежности выпускаемых систем может быть загрязненное содержание оборудования и рабочих мест. Важным методом повышения надежности систем является правильная организация производственного контроля и уровень культуры производства. Особый вред надежности системы наносится скрытыми производственными дефектами в результате нарушения технологического процесса. Обычно скрытые дефекты представляют

наибольшие трудности при техническом контроле. Наряду с техническим контролем надежность сложных систем может быть существенно повышена, особенно для начального периода эксплуатации, проведением тренировочных испытаний системы (приработки) в производственных условиях. Это позволяет устранить большинство производственных и скрытых отказов, если приработка системы проходит при больших, по сравнению с номинальными, нагрузками.

Основные **эксплуатационные факторы**, влияющие на надежность: воздействия окружающей среды, условия эксплуатации системы и квалификация обслуживающего персонала.

К факторам окружающей среды в первую очередь следует отнести климатические (температура, влажность, давление, радиация и др.) условия, при которых эксплуатируется система.

Правильная организация эксплуатации системы является одним из решающих факторов обеспечения надежности. Большое значение имеет и своевременное проведение профилактических мероприятий, позволяющих предупредить появление отказов системы в рабочий период времени. Одним из современных методов профилактики является прогнозирование отказов, позволяющее своевременно заменить так называемые критические элементы и тем самым исключить их отказы. Естественно, что полностью исключить отказы в период эксплуатации не удастся, поэтому необходимо построить систему эксплуатации (ТО и ремонт, снабжение ЗИП и др.) объекта таким образом, чтобы обеспечить минимальное время восстановления отказавшей системы.

Таким образом, требуемая надежность системы может быть обеспечена только комплексом методов, применяемых на всех этапах ее жизненного цикла.

### ***3.1.2 Основные пути обеспечения надежности на различных этапах жизненного цикла систем***

Основные пути обеспечения надежности непосредственно связаны с мероприятиями, имеющими **предупредительный, контрольный** и **защитный** характер (табл. 3.1 – 3.3).

В качестве основных принципов современной методологии обеспечения надежности следует рассматривать:

- системный подход к обеспечению надежности на основе ПОН, поэтапное подтверждение требований по надежности;
- использование вероятностных и нечетких показателей надежности;
- всесторонние отработочные испытания в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным;
- использование на стадиях опытно-конструкторских работ систем автоматизированного проектирования, позволяющих сократить сроки разработки, избежать конструкторских ошибок, проводить сравнение различных вариантов построения систем, оптимизировать проекты по показателям эффективности, надежности и стоимости;

- использование на стадии производства автоматических и автоматизированных технологических процессов, контрольных систем и средств неразрушающего контроля;
- использование экспериментальной базы, позволяющей проводить эффективные испытания и отработку элементов систем и систем в целом;
- использование современной системы информации о надежности и техническом состоянии систем, более детально учитывающей физические параметры, определяющие их работоспособность, ремонтпригодность, сохраняемость и долговечность.

Таблица 3.1 – Мероприятия по обеспечению надежности на этапе разработки

Характер мероприятия	Перечень мероприятий
Предупредительный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– использование отработанных методов и средств обеспечения надежности;</li> <li>– анализ альтернативных проектно-конструкторских решений и выбор наилучших;</li> <li>– создание запасов работоспособности по нагрузкам и отказам различных видов; использование резервирования;</li> <li>– выбор высоконадежных комплектующих элементов и материалов;</li> <li>– создание контролепригодных и ремонтпригодных элементов;</li> <li>– обучение проектантов, конструкторов, испытателей передовым методам и способам обеспечения надежности;</li> <li>– установление проектных норм надежности и норм испытаний при экспериментальной отработке;</li> <li>– разработка новых средств контроля и диагностики</li> </ul>
Контрольный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– экспериментальная проверка технических решений, особенно новых;</li> <li>– проверка всех режимов функционирования;</li> <li>– автономные и комплексные испытания;</li> <li>– контроль и корректировка конструкторской документации;</li> <li>– экспериментальная проверка запасов работоспособности во всех режимах функционирования;</li> <li>– контроль надежности;</li> <li>– контроль качества труда исполнителей,</li> <li>– самоконтроль</li> </ul>
Защитный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ видов, последствий и критичности отказов;</li> <li>– введение специальных приборов в состав системы, обеспечивающих безопасность при возникновении отказов;</li> <li>– отработка основных отказовых режимов функционирования;</li> <li>– тренировка персонала;</li> <li>– реализация технических решений по локализации отказов;</li> <li>– применение оперативного контроля и управление функционированием;</li> <li>– обеспечение сохранения работоспособности элемента при отказах в системах;</li> <li>– разработка системы обслуживания и восстановления техники</li> </ul>

Таблица 3.2 – Мероприятия по обеспечению надежности на этапе производства

Характер мероприятия	Перечень мероприятий
Предупредительный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– выбор прогрессивных и стабильных технологических процессов;</li> <li>– отработка новых технологических процессов и средств контроля до начала пуска производства;</li> <li>– отработка и корректировка технологической документации;</li> <li>– обучение и аттестация производственного персонала к работе на ответственных операциях;</li> <li>– надзор за состоянием производственного оборудования и средств контроля.</li> </ul>
Контрольный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– проведение входного пооперационного и выходного контроля;</li> <li>– проверка режимов запасов;</li> <li>– контрольно-технологические испытания;</li> <li>– контроль качества труда исполнителей,</li> <li>– самоконтроль;</li> <li>– авторский надзор;</li> <li>– контроль качества и стабильности технологических процессов</li> </ul>
Защитный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– использование избыточности (дублирование) в оборудовании и средствах контроля;</li> <li>– введение блокировок в ответственные технологические процессы;</li> <li>– разработка системы обслуживания и восстановления производственного оборудования и средств контроля</li> </ul>

Таблица 3.3 – Мероприятия по обеспечению надежности на этапе эксплуатации

Характер мероприятия	Перечень мероприятий
Предупредительный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– использование автоматизированных средств контроля и поиска неисправностей;</li> <li>– отработка эксплуатационно-технической документации;</li> <li>– проведение предварительных регламентных работ;</li> <li>– оценка и прогнозирование технического состояния и надежности;</li> <li>– аттестация и обучение персонала</li> </ul>
Контрольный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– автоматизированная регистрация и обработка информации о командах, отказах и неисправностях;</li> <li>– контроль качества;</li> <li>– самоконтроль;</li> <li>– гарантийный надзор</li> </ul>
Защитный	<ul style="list-style-type: none"> <li>– проведение оперативных доработок;</li> <li>– использование автоматических средств защиты;</li> <li>– использование запасных частей, обменного фонда;</li> <li>– анализ последствий отказов и реализация защитных мероприятий;</li> <li>– обучение и аттестация персонала для работы при возникновении отказов</li> </ul>



### 3.1.3 Технические средства обеспечения надежности

Технические средства (элементная база, экспериментальные и производственные возможности) являются важнейшей составной частью активных средств, позволяющих, в конечном счете, добиться высокой надежности систем. Отсутствие материально-технической основы высокой надежности систем не может быть скомпенсировано другими средствами обеспечения (организацией работ, реализацией системного подхода, методического, нормативного или информационного обеспечения).

Уровень технического обеспечения зависит от следующих факторов:

- уровня качества и надежности материалов, полуфабрикатов, электро- и радиодеталей, комплектующих элементов, агрегатов и изделий общего назначения, выпускаемых промышленностью и используемых в составе технических систем;
- технического уровня, номенклатуры, количества, производительности, автоматизации технических средств для проектирования, конструирования, отработки, производства, контроля и эксплуатации сложных систем;
- уровня автоматизации и оперативного сбора, обработки, обмена информацией для планирования, координации и контроля за ходом создания и применения систем.

Для создания высоконадежных и эффективных систем необходимо, чтобы новые материалы, электронные изделия и др. комплектующие обладали высокими показателями надежности, достаточными для практически безотказной эксплуатации перспективных систем в определенных для них условиях в течение срока эксплуатации, равного сроку их морального старения.

Чем сложнее создаваемые системы, тем больше в системе причин и источников отказов, тем проблематичнее возможность обеспечения надежности на уже достигнутом научно-техническом уровне технических средств проектирования, конструирования, экспериментальной отработки, производства и эксплуатации.

Все технические средства обеспечения надежности, которые используют при создании и эксплуатации технических систем, могут быть условно разделены на три класса:

- средства предупреждения;
- средства контроля;
- средства защиты.

**3.1.3.1 Средства предупреждения.** Средства предупреждения отказов систем одновременно являются и техническими средствами, позволяющими выбрать и детально разработать наилучшую конструкцию, оформить документацию, обеспечить полную экспериментальную обработку.

К числу технических средств, используемых для предупреждения отказов и отклонений конструктивного характера, относят:

- автоматизированные комплексы моделирования, имеющие необходимое математическое обеспечение и позволяющие проектантам разрабатывать большое число альтернативных вариантов элементов системы и выбрать наиболее надежные и эффективные;
- средства автоматизированной разработки конструкторской и технологической документации, позволяющие исключить ошибки в документации и значительно ускорить ее разработку;
- современное экспериментальное оборудование, позволяющее своевременно отрабатывать новые технические решения, обеспечить высокую надежность элементов;
- технические средства обучения и повышения квалификации проектантов, конструкторов и других сотрудников предприятий-разработчиков;
- автоматизированную систему информации по вопросам качества и надежности элементов.

К числу технических средств, предупреждающих отказы и отклонения производственного характера, относят:

- прогрессивное автоматизированное производственно-технологическое оборудование, средства контроля и управления технологическими процессами;
- технические средства входного неразрушающего контроля и диагностики, исключающие попадание в производство недостаточно качественных материалов, полуфабрикатов и комплектующих элементов;
- автоматизированные средства обучения рабочих и инженерно-технических работников предприятий-изготовителей;
- автоматизированную систему информации по качеству и надежности систем в производстве.

К числу технических средств предупреждения отказов в эксплуатации относят:

- технические средства для отработки эксплуатационной документации (стенды, макеты, имитаторы) и обучения эксплуатирующего персонала;
- автоматизированные средства контроля, диагностики и поиска неисправностей;
- технические средства для проведения предупредительных и регламентных работ.

**3.1.3.2 Средства контроля.** К числу технических средств, обеспечивающих контроль и выявление отказов конструктивного характера, относят:

- экспериментальную базу, достаточную для контроля правильности заложенных технических решений, проверки запасов работоспособности элементов во всех режимах функционирования, контроля надежности;

- технические средства контроля и корректировки конструкторской документации, качества труда исполнителей.

Технические средства контроля надежности в производстве технических систем предназначены для осуществления следующих функций:

- проведения эффективного входного, пооперационного и приемочного контроля качества элементов;

- проверки режимов функционирования, запасов работоспособности, проведения контрольно-технологических испытаний;

- контроля качества сборки и совместного функционирования групп элементов;

- контроля качества технологической документации, стабильности технологических процессов, качества труда исполнителей.

Технические средства контроля надежности в эксплуатации:

- технические средства неразрушающего контроля и диагностики;

- автоматизированные средства регистрации и обработки информации о результатах функционирования элементов систем, об отказах и неисправностях;

- технические средства прогнозирования работоспособности элементов, контроля и поиска неисправностей;

- автоматизированные средства контроля качества работы операторов.

**3.1.3.2 Средства защиты.** К числу технических средств защиты, используемых для недопущения отказов или устранения последствий отказов, относят:

- технические средства локализации отказов, вводимые в состав системы;

- технические средства оперативного контроля и управления функционированием при возникновении опасных ситуаций, блокировки в ответственных технологических процессах, исключающие возможности разрушения элементов системы при нарушении технологического процесса.

В процессе эксплуатации для уменьшения ущерба от возможных отказов предусматривают следующие технические средства:

- пожаро-взрывобезопасности и пожаротушения;

- автоблокировки, исключающие прохождение и выполнение неправильных команд;

- предупреждения ошибочных действий операторов.

При разработке новых систем необходимо с опережением создавать и применять на каждой стадии технические средства:

- предупреждения отказов и отклонений от намеченного хода технологического процесса;

- средства оперативного контроля и выявления причин;

- средства защиты от вредных последствий отказов и отклонений.

Таким образом, средства защиты – это совокупность организационных и технических средств, используемых в системах для поддержания заданного режима технологических процессов, предотвращения аварийных ситуаций и (или) повреждения элементов систем.

Современные ИИК, входящие в состав агрегатов и систем более высокого уровня, сами являясь объектами обеспечения надежности, одновременно выступают в качестве эффективных технических средств обеспечения надежности.

### 3.2 Прогнозирование технического состояния систем

Прогнозирование технического состояния системы является неотъемлемой частью обеспечения ее надежности и направлено на предсказание работоспособности, определение остаточного ресурса (срока службы), наступление предельного состояния, обоснование срока проведения ТО по состоянию, сокращение длительности ТО и поиска неисправностей, определение необходимого количества ЗИП и обслуживающего персонала. В целом задача прогнозирования технического состояния системы может быть разбита на две подзадачи:

- непосредственно *прогнозирование технического состояния*, под которым понимается процесс предсказания значений параметров, определяющих техническое состояние, в будущем на определенный момент или за определенный интервал времени;
- *прогнозирование отказов* – процесс предсказания момента отказа или интервала времени, в течение которого отказ возможен.

Взаимосвязь основных процедур прогнозирования технического состояния системы представлена на рис. 3.3.

Необходимо отметить, что основу прогнозирования технического состояния системы составляют модели и методы, позволяющие наиболее достоверно и точно описать процессы изменения параметров системы, определяющих ее техническое состояние. Основными задачами в этой области являются:

- анализ механизмов влияния окружающей среды, режимов работы системы и др. факторов на процессы изменения параметров системы и ее элементов, определяющих их техническое состояние, и определение комплекса существенных воздействующих факторов;
- выбор вида математических моделей прогнозирования технического состояния системы и ее элементов;
- обоснование входных и выходных параметров моделей;
- структурная и параметрическая идентификация моделей;

- разработка метода и алгоритмов прогнозирования технического состояния составных частей систем и системы в целом на основе полученных моделей;
- разработка методики прогнозирования технического состояния системы.



Рисунок 3.3 – Основные процедуры прогнозирования технического состояния

Прогнозирование технического состояния осуществляется на различных этапах жизненного цикла системы.

### ***3.2.1 Классификация моделей и методов прогнозирования технического состояния***

Существующие математические модели, позволяющие прогнозировать техническое состояние системы и ее составных частей, можно классифицировать по следующим признакам [14, 17]:

- по цели моделирования: прогнозирования технического состояния и отказов;
- по характеру исследуемых процессов: детерминированные и стохастические;
- по динамике исследуемых процессов: статические и динамические;
- по количеству воздействующих факторов, которые учитываются в модели: однофакторные и многофакторные;
- по количеству контролируемых параметров, описывающих техническое состояние объекта исследования: одномерные и многомерные;

– по источнику информации, на основе которого получают сведения об изучаемых процессах: модели, синтезированные на основе результатов ускоренных лабораторных испытаний, и модели, полученные в результате обработки данных подконтрольной эксплуатации и диагностики объектов в реальных условиях эксплуатации.

Классификация моделей прогнозирования приведена на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Классификация моделей прогнозирования

Кроме того, во всех вышеперечисленных классах математических моделей можно выделить группы, при помощи которых происходит их формирование (см. рис. 3.4):

– физические или аналитические модели, полученные на основе изучения физических закономерностей, структура уравнений и параметры моделей имеют физическое толкование;

– вероятностные модели, построенные на основе статистических наблюдений с применением аппарата теории вероятностей и математической статистики;

– формальные (регрессионные, авторегрессионные, скользящего среднего, смешанные и т.д.) модели, полученные на основе анализа зависимости входных и выходных параметров объекта, представленного в виде абстрактного кибернетического «черного ящика» при помощи прикладного статистического анализа.

Методы прогнозирования технического состояния систем можно классифицировать по следующим признакам:

- по типу объекта прогнозирования и способу использования исходных данных: индивидуальные, групповые и комбинированные;
- по значимости параметра: по основному параметру и по вспомогательному параметру, связанному с основным;
- по виду прогнозируемых процессов: прогнозирования детерминированных процессов, прогнозирования стохастических (стационарных и нестационарных) процессов.
- по подходу к решению задачи прогнозирования: экстраполяции и статистической классификации.
- по применяемому математическому аппарату: методы экстраполяции и интерполяции; методы, использующие аппарат регрессионного и корреляционного анализа; методы, использующие факторный анализ.

Данную классификацию можно представить в виде дерева методов и моделей прогнозирования (рис. 3.5). Однако, представленные виды моделей, описывают лишь определенные стороны процесса изменения параметров, определяющих техническое состояние системы.

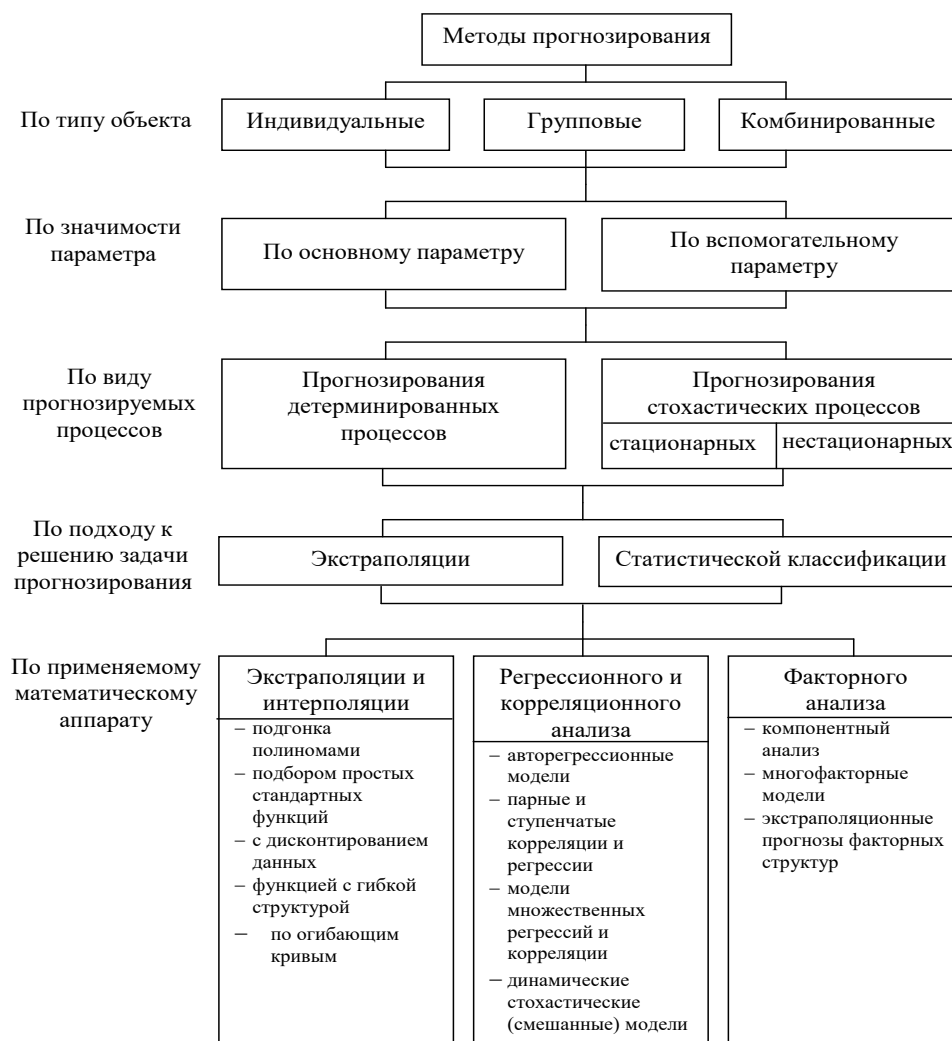


Рисунок 3.5 – Дерево методов и моделей прогнозирования

Аналитические модели, как правило, связывают процесс старения системы и ее элементов не более чем с двумя – тремя эксплуатационными факторами. Попытки учесть большее количество исходных параметров приводят к громоздкому виду модели, при этом снижается ее практическая ценность. Кроме того, аналитические модели не учитывают случайного характера процесса изменения значений параметра.

Основным недостатком вероятностных моделей является сложность получения статистических данных, учитывающих все многообразие условий эксплуатации. Такие модели используются преимущественно для расчета надежности (прогнозирования технического состояния) системы на стадии проектирования и изготовления.

На этапе эксплуатации наиболее эффективными являются эмпирические (формальные) модели, которые описывают в явном виде зависимость изменения параметров технического состояния от воздействующих факторов окружающей среды, режимов и условий работы. Регрессионные модели позволяют учитывать зависимость выходного параметра модели от любого количества входных параметров и всевозможных их сочетаний, но при этом не учитывают предыдущее состояние наблюдаемого параметра, т.е. строятся по единственному временному сечению. Модели авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего описывают процесс динамически, т.е. развернутым во времени, но совершенно игнорируют входные параметры, сводя сумму эксплуатационных воздействий к «белому шуму».

Модели на основе простых стандартных функций широко используются в практике инженерных расчетов, которые требуют простых моделей прогнозирования технического состояния элементов систем для ориентировочной оценки их остаточного срока службы. Они описывают трендовую составляющую процесса старения. Метод прогнозирования на основе данных моделей относится к приближенным, но его отличает простота, наглядность представления процесса и сравнительная несложность вычислительных операций при практическом использовании.

Регрессионные модели используются для описания статических зависимостей, имеющих детерминированный характер. Данные модели получили широкое распространение при обработке экспериментальных лабораторных испытаниях на надежность систем и их элементов, где четко определены воздействующие факторы.

Наиболее точными с точки зрения прогнозирования и эффективными являются многофакторные динамические стохастические модели, но для их практического использования требуется применение вычислительных средств. Они учитывают в явном виде целый комплекс внешних и внутренних воздействующих факторов, состояние системы в предшествующие периоды времени, а также включают случайные воздействия, неучтенные явно в наборе входных параметров модели, и используются при обработке экспериментальных данных подконтрольной эксплуатации и диагностики системы. Данные модели наиболее подходят для прогнозирования случайных



динамических процессов, к которым относят старение элементов системы в реальных условиях эксплуатации.

### 3.2.2 Модели дрейфа параметров

Параметры системы, определяющие ее состояние, с течением времени изменяют свои значения под воздействием множества факторов, которые носят случайный характер. С учетом воздействия дестабилизирующих факторов, процесс случайного дрейфа параметров может аппроксимировать в виде

$$Y_{\langle m \rangle}(t) = \zeta_{\langle m \rangle}(t) + \psi_{\langle m \rangle}(t), \quad (3.1)$$

где  $Y_{\langle m \rangle}(t)$  –  $m$ -мерный случайный процесс дрейфа параметров;

$\zeta_{\langle m \rangle}(t)$  – нестационарный (обычно монотонный)  $m$ -мерный случайный процесс необратимых изменений значений параметров;

$\psi_{\langle m \rangle}(t)$  – стационарный  $m$ -мерный случайный процесс обратимого изменения значений параметров под воздействием внешних условий.

Необратимые изменения значений параметров в основном обусловлены деградационными процессами старения и износа, которые приводят к отказу системы. Обратимые изменения параметров являются стационарными процессами и могут рассматриваться как некоторая высокочастотная составляющая случайного процесса, обусловленная флуктуациями внутренних факторов.

Процесс случайного дрейфа параметров может быть описан и в виде

$$Y_{\langle m \rangle}(t) = M[Y_{\langle m \rangle}(t)] + \eta_{\langle m \rangle}(t), \quad (3.2)$$

где  $M[Y_{\langle m \rangle}(t)]$  – детерминированная составляющая  $m$ -мерного случайный процесса необратимых изменений значений параметров;

$\eta_{\langle m \rangle}(t)$  – случайная составляющая  $m$ -мерного случайный процесса, обусловленная воздействием внутренних и внешних факторов, а также погрешностями измерений.

Процесс дрейфа параметров (3.2) в зависимости от вида и величины составляющих  $M[Y_{\langle m \rangle}(t)]$  и  $\eta_{\langle m \rangle}(t)$  может быть описан различными способами. Например, (3.2) может быть представлено прогнозирующей функцией в виде ортогонального канонического выражения

$$Y_{\langle m \rangle}(t) = M[Y_{\langle m \rangle}(t)] + \sum_{i=1}^n V_i f_i(t), \quad (3.3)$$

где  $V_i$  – некоррелированные случайные величины, математическое ожидание которых равно 0;

$f_i(t)$  – детерминированные функции времени, называемые ортогональными координатами.

При выборе вида прогнозирующей функции  $W(Y_{\langle m \rangle}; t)$  учитывается:

- характер протекающего процесса: эволюционный или возможен скачок;
- прошлый опыт, позволяющий определить, является ли прогнозирующая функция детерминированной, либо стохастической.
- степень изученности процесса, что эквивалентно виду математического описания;
- вид функции, описывающей детерминированную составляющую процессов старения и износа (тренд).

На рис 3.6 представлены возможные варианты прогнозирующей функции.

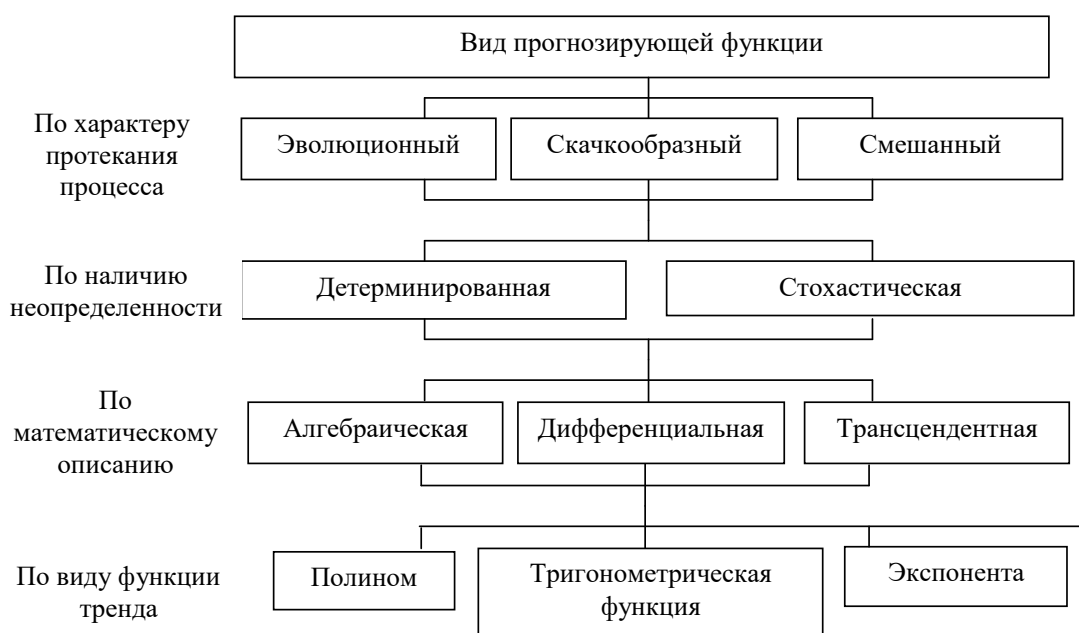


Рисунок 3.6 – Вид прогнозирующей функции

Следует обратить внимание на формулировки задач прогноза по применению различных алгоритмов, использующих знание прогнозирующей функции.

Например, при использовании алгоритмов экстраполяции задача формулируется следующим образом:

Дано: процесс, отображающий изменение состояния системы представлен в виде (3.2), который дискретно и непрерывно наблюдается на интервале времени  $[t_0; t_k]$  и известны значения  $Y_{(m)}(t_0), Y_{(m)}(t_1), \dots, Y_{(m)}(t_k)$  в моменты времени  $t_0, t_1, \dots, t_k$ , а также модель прогнозирования  $W(Y_{(m)}; t)$ .

Найти:  $Y_{(m)}(t_{k+j}) = W(Y_{(m)}; t_j)$ , при  $j = \overline{1; n}$ , т.е.  $Y_{(m)}(t_{k+1}), Y_{(m)}(t_{k+2}), \dots, Y_{(m)}(t_{k+n})$  в моменты времени  $t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_{k+n}$ .

При использовании алгоритмов статистической классификации задача формулируется иначе:

Дано: в начальный момент времени  $t_0$  или ограниченный начальный период времени известны значения  $Y_{(m)}(t_0)$ , а также модель прогнозирования  $W(Y_{(m)}; t)$ .

Найти: принять решение о принадлежности системы к тому или иному классу  $R^l$ . Классы могут устанавливаться по принадлежности значений параметров области работоспособности и (или) по принадлежности интервалу безотказной работы системы.

### 3.2.3 Оценка качества прогнозирования

Оценка качества прогнозирования проводится в следующих целях [5]:

- для оценки целесообразности прогнозирования;
- для сравнения методов прогнозирования;
- для оценки влияния результатов прогнозирования на эксплуатационно-технические характеристики системы и стоимость ее эксплуатации.

Целесообразность прогнозирования технического состояния системы определяется при анализе требований к ее качеству и методу прогнозирования. В зависимости от предъявляемых к системе и методу требований в качестве показателя может быть использован коэффициент целесообразности прогнозирования  $k_{цп}$ , характеризующий относительную долю эффекта повышения надежности (долговечности или безотказности) системы от результатов прогнозирования:

$$k_{цп} = \frac{K_G^{ПП} - K_G}{K_G} \quad (3.4)$$

$$k_{цп} = \frac{P^{ПП} - P}{P} \quad (3.5)$$

где  $K_G^{ПП}$  и  $P^{ПП}$  – соответственно коэффициент готовности и ВБР системы при использовании результатов прогнозирования;

$K_G$  и  $P$  – соответственно коэффициент готовности и ВБР системы, в которой прогнозирование не используется.

При сравнении методов прогнозирования необходимо учитывать:

- затраты ресурсов всех видов на проведении прогнозирования, которые могут определяться суммарной стоимостью аппаратуры для прогнозирования, измерений и вычислений, расходами на персонал и т.д.;
- временные затраты на прогнозирование (быстродействием прогнозирования)  $t_{пр}$ ;
- интервал прогнозирования  $\Delta t_{пр}$ ;
- достоверность прогнозирования  $D$ , которая характеризует соответствие результатов прогнозирования истине. Причем достоверность

следует рассматривать как для положительного результата прогноза  $D^+$  (достоверность нахождения системы в работоспособном состоянии), так и отрицательного результата  $D^-$  (достоверность отказа системы).

– точность прогнозирования, которая определяется степенью соответствия величины, полученной в результате прогноза, истинному значению. В качестве показателей точности обычно используют абсолютные и относительные погрешности прогнозов значений параметров системы  $\Delta_y$  и  $\varepsilon_y$ , математического ожидания и дисперсии значений параметров системы  $\Delta_{M[y]}(\varepsilon_{M[y]}), \Delta_{D[y]}(\varepsilon_{D[y]}).$

Окончательная оценка влияния прогнозирования на эксплуатационно-технические характеристики системы и стоимость эксплуатации может быть получена только после окончания интервала прогнозирования. В качестве такого показателя выступает эффективность прогнозирования, характеризующая экономический выигрыш от использования результатов прогнозирования.

### ***3.2.4 Оценка остаточного ресурса при его назначении и продлении***

Известно, что любая сложная техническая система обладает конечным ресурсом или сроком службы, в течение которого ее параметры поддерживаются в пределах, заданных техническими условиями или НТД. По истечении этого срока наступает предельное состояние системы.

Все множество причин, вызывающих наступление предельного состояния, можно разделить на два класса. Первый из них обусловлен ***физическим старением и износом*** элементов системы, которое может проявляться в виде появления неустранимых отказов, неустранимого снижения уровня надежности и безопасности, а также недопустимо высокого возрастания эксплуатационных затрат на поддержание работоспособного состояния.

Второй класс причин связан с отставанием технического уровня системы от изменившихся потребностей пользователей, т.е. ***моральным старением***.

Вследствие того, что оба класса описанных причин действуют, как правило, одновременно, в процессе эксплуатации системы могут возникать потребности как в проведении ремонтно-восстановительных и ремонтно-профилактических работ по устранению последствий физического старения и износа, так и в осуществлении различных доработок и модернизаций оборудования.

Необходимо отметить, что по мере ускорения научно-технического прогресса в эксплуатации сложных систем все более проявляется тенденция, когда темпы морального старения оборудования систем, как правило, опережают сроки наступления предельного состояния из-за физической деградации их элементов. Необходимо отметить, что в настоящее время темпы внедрения в практику достижений научно-технического прогресса сравнимы с периодом разработки и внедрения в производство сложных технических

систем, вследствие чего разработка новой системы или модернизация существующей начинается, как правило, уже с момента начала ее эксплуатации.

В каждый момент времени можно различать две части любого ресурса: израсходованную к этому моменту в виде состоявшейся суммарной наработки и оставшуюся до перехода в предельное состояние. Остаток ресурса («остаточный ресурс») оценивают ориентировочно, поскольку ресурс в целом является случайной величиной.

Под остаточным (после некоторой наработки  $\tau$ ) ресурсом объекта понимается его наработка, начиная с момента  $\tau$ , до перехода в предельное состояние при установленных режимах применения и условиях эксплуатации.

Если обозначить  $\xi$  – наработку объекта от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние, то остаточный ресурс  $\xi_\tau$  после времени  $\tau$  равен  $\xi_\tau = \xi - \tau$ , где  $\xi \geq \tau$ . В качестве  $\tau$  в задачах продления ресурса обычно рассматривается момент окончания действия ранее назначенных ресурса (срока службы). Поскольку  $\xi$  является случайной величиной,  $\xi_\tau$  также случайна и характеризуется условной плотностью распределения  $f_\tau(t)$ . Параметры данного распределения служат показателями остаточного ресурса.

Поскольку, как уже было сказано выше,  $\xi_\tau$  является случайной величиной, то можно говорить о ее числовых характеристиках в качестве показателей остаточного ресурса.

При оценивании остаточного ресурса применяют следующие показатели:

– средний остаточный ресурс  $\bar{T}_\tau$  – математическое ожидание случайной величины  $\xi_\tau$

$$\bar{T}_\tau = \int_0^{\infty} P_\tau(t) dt = \frac{1}{P(\tau)} \int_\tau^{\infty} P(t) dt, \quad (3.6)$$

где  $P_\tau(t)$  – условная вероятность недостижения системой предельного состояния на интервале  $[\tau; \tau+t]$ , при условии, что до момента  $\tau$  система не достигла предельного состояния;

– гамма-процентный остаточный ресурс  $T_\gamma(\tau)$  есть наработка с момента времени  $\tau$ , в течение которой проработавший до момента  $\tau+T_\gamma(\tau)$  объект не перейдет в предельное состояние с вероятностью не менее  $\gamma$ , выраженной в процентах.  $T_\gamma(\tau)$  определяется из выражения

$$P_\tau[\tau+T_\gamma(\tau)] = \gamma/100. \quad (3.7)$$

Вероятность  $P_\tau(t)$  определяется при условии, что до момента  $\tau$  объект не достиг предельного состояния по формуле

$$P_\tau(t) = \frac{P(\tau+t)}{P(\tau)}, \quad (3.8)$$

где  $P(\cdot)$  – безусловная вероятность недостижения ПС на соответствующем интервале.

На практике применяются два возможных способа оценки остаточного ресурса.

Первый способ применяется в отношении объектов, для которых продление назначенных ресурса и (или) срока службы осуществляется без проверки на работоспособность, например, находящихся на хранении, либо недоступных для контроля по каким-либо причинам. В данном случае оценка остаточного ресурса объекта проводится по истечении некоторого интервала наработки  $\tau$  ( $\tau > 0$ ) после последнего полного контроля работоспособности объекта, в частном случае – после начала эксплуатации. Такие модели оценки остаточного ресурса подробно изложены в [18].

Последовательность оценке остаточного ресурса при  $\tau > 0$  следующая.

По функции  $P(t)$  для заданного момента  $\tau$  определяются значения  $P(\tau)$  и  $P(\tau+t)$ .

С использованием формулы (3.8) строится функция  $P_\tau(t)$  – зависимость условной вероятности недостижения предельного состояния (безотказной работы объекта по отношению к неустраняемым отказам) от наработки.

С помощью формулы (3.6) определяется значение среднего остаточного ресурса объекта  $\bar{T}_\tau$  после момента  $\tau$ .

Значение гамма-процентного остаточного ресурса  $T_\gamma(\tau)$  объекта определяется на основе формулы (3.4).

Рис.3.7 иллюстрирует процесс получения вышеперечисленных оценок.

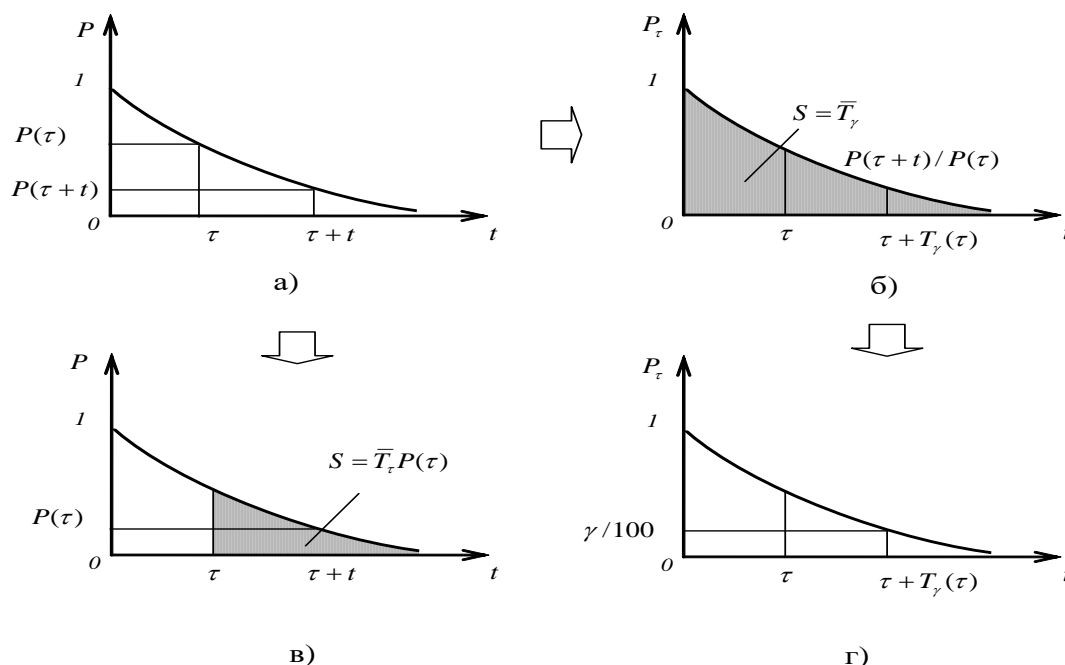


Рисунок 3.7 – Оценка остаточного ресурса при  $\tau > 0$ :

- (а) определение значений  $P(\tau)$  и  $P(\tau+t)$  по функции  $P(t)$ ;
- (б) определение значения  $T(\tau)$  по функции  $P_\tau(t)$ , где  $S$  – площадь под кривой;
- в) определение значения  $T(\tau)$  по функции  $P(t)$ ;
- (г) определение значения  $T_\gamma(\tau)$  по функции  $P_\tau(t)$ .

Второй способ применяется в отношении объектов, для которых продление назначенных показателей ресурса осуществляется после полной проверки работоспособности с обработкой всех доступных к данному моменту исходных данных о надёжности элементов объекта. Данная ситуация имеет место при оценивании остаточного ресурса объектов непосредственно после окончания обследования фактического технического состояния с помощью приборов неразрушающего контроля и проверки на функционирование, когда работоспособность всех составных частей достоверно установлена.

При этом начало координат, в которых строится функция изменения вероятности недостижения предельного состояния переносится в точку  $\tau$ , а расчет показателей остаточного ресурса осуществляется по формулам (3.6) и (3.4) при  $\tau = 0$ .

Для случая, когда  $\tau = 0$ , имеем:

$$\bar{T}_\tau = \frac{1}{P(0)} \int_0^\infty P(t) dt = \int_0^\infty P(t) dt = \bar{T}; \quad (3.9)$$

$$P_\tau(t) = \frac{P(t)}{P(0)} = P(t); \quad (3.10)$$

$$T_\gamma(\tau) = t / P(t) = \gamma / 100. \quad (3.11)$$

Таким образом, при  $\tau = 0$  средний остаточный ресурс равен среднему ресурсу, а остаточный гамма-процентный ресурс – гамма-процентному ресурсу, отсчитываемым с момента  $\tau$ . Рис. 3.8 поясняет особенности оценивания показателей остаточного ресурса для случая  $\tau = 0$ .

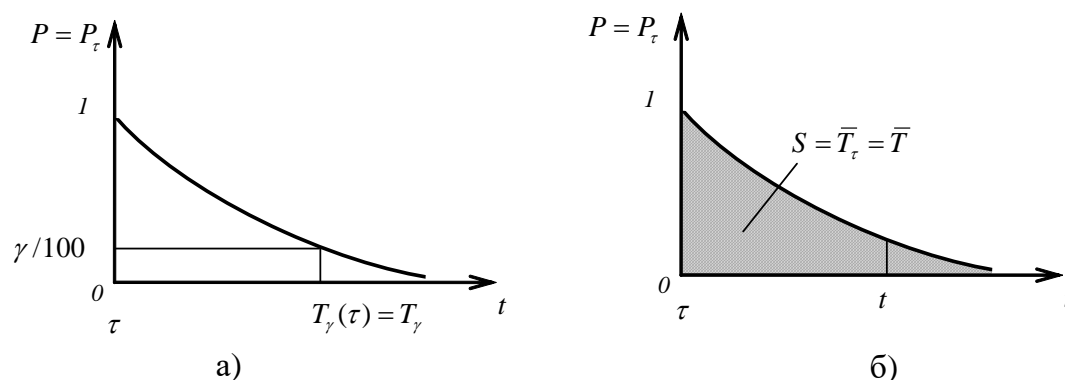


Рисунок 3.8 – Оценка остаточного ресурса при  $\tau = 0$ :

(а) определение значения  $T_\gamma(\tau)$ ;

(б) определение значения  $\bar{T}_\tau$ , где  $S$  – площадь под кривой

В практике эксплуатации чаще всего используется оценивание показателей остаточного ресурса вторым способом.

Все вышесказанное относительно порядка оценивания остаточного ресурса справедливо и в отношении остаточного срока службы.

Для ряда объектов, выполняющих особо ответственные функции, переход в предельное состояние особенно нежелателен или недопустим в связи с возможными негативными последствиями такого перехода.

В этих случаях предусматривают принудительное заблаговременное прекращение применения объекта до его перехода в предельное состояние.

По истечении назначенного ресурса (срока службы) применение объекта по назначению прекращается, производится его освидетельствование (обследование), после чего принимается одно из решений: либо его эксплуатация продляется, либо производится его средний или капитальный ремонт, либо объект списывается и утилизируется.

**Под продлением назначенных показателей** понимают комплекс работ по определению возможности эксплуатации объекта за пределами первоначально установленных в конструкторской документации значений, назначенных ресурса (срока службы), разработке и реализации мероприятий по обеспечению эксплуатации на продлеваемый период.

Работы по продлению назначенных показателей проводят для наиболее полного использования фактических ресурсов объектов и экономии материальных средств. При новых значениях назначенных показателей, установленных в результате проведения работ по их продлению должно быть также обеспечено полное соответствие показателей надежности, безопасности, либо экономической эффективности требованиям и нормам, установленным в конструкторской документации. В обоснованных случаях допускается пересмотр (снижение либо повышение) первоначально установленных требований и норм на отдельные показатели качества до уровня, определяемого совместным решением заказчика и головного разработчика объекта.

Если объект продолжительное время должен находиться на хранении, то устанавливают назначенный срок хранения, по истечении которого, как и по истечении назначенного ресурса или срока службы, дальнейшее применение объекта по назначению недопустимо, но в отличие от этих двух величин по истечении назначенного срока хранения дальнейшее пребывание объекта в этом режиме не ограничивается, но если потребуется применение объекта, то предварительно должна осуществляться по меньшей мере особо тщательная, всесторонняя и достаточно глубокая проверка его технического состояния и проведение при необходимости восстановительных работ.

Потенциальная возможность продления эксплуатации после истечения срока действия первоначально назначенных ресурса и срока службы вытекает из особенностей их установления.

Установление назначенных ресурса и срока службы происходит на стадии создания объекта в условиях неизбежной неполноты информации об ожидаемых условиях эксплуатации и индивидуальных свойствах объекта, определяющих динамику расходования его технического ресурса. Такую неопределенность полностью принципиально устранить невозможно. В то же время при задании значений, назначенных ресурса и срока службы необходимо с определенной уверенностью гарантировать, что в пределах установленных назначенных ресурса и срока службы предельное состояние объекта не наступит.



Поэтому при определении назначенных ресурса и срока службы вынуждены ориентироваться на максимально неблагоприятное сочетание условий и режимов эксплуатации и характеристик самого изделия. Схема определения значений, назначенных ресурса и срока службы на стадии создания показана на рис. 3.9.

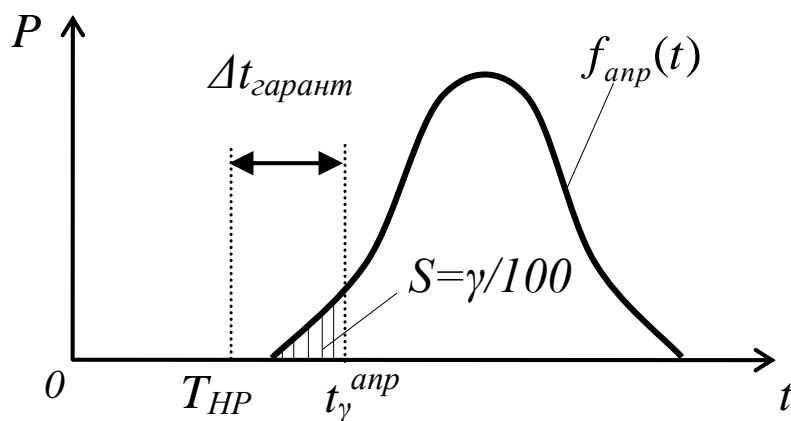


Рисунок 3.9 – Схема определения значений, назначенных ресурса на стадии создания объекта

Установление назначенных ресурса и срока службы базируется на условном априорном распределении  $f_{анп}(t)$  наработок до предельного состояния. Условность данного распределения связана с допущением о действии максимально неблагоприятных для ресурса объекта условий, а априорность – с тем, что характеристики данного распределения оцениваются до начала эксплуатации (до опыта). Значение  $T_{НР}$  не может превышать величину условной априорной оценки гамма-процентного ресурса объекта

$$t_{\gamma}^{анп} = t \left| \int_0^t f_{анп}(t) = 1 - \frac{\gamma}{100} \right. \quad (3.12)$$

Кроме того, для страховки иногда специально применяется некоторое занижение  $T_{НР}$  относительно  $t_{\gamma}^{анп}$  на величину  $\Delta t_{гарант}$ . Тем самым достигается определенная уверенность в недостижении предельного состояния в пределах срока действия назначенного ресурса.

Однако платой за такую уверенность является занижение возможных сроков эксплуатации объекта и недоиспользование заложенного при проектировании и изготовлении индивидуального запаса ресурса.

На стадии эксплуатации объекта по истечении срока  $\tau = T_{НР}$ , как правило, уже накоплена некоторая информация об условиях и режимах эксплуатации объекта и надежности его составных частей.

Увеличить объем такой информации помогает специальное углубленное обследование фактического технического состояния объекта. При этом появляется возможность уточнить исходное условное априорное распределение  $f_{анп}(t)$  и перейти к безусловному апостериорному распределению  $f_{аносм}(t)$  (рис

3.10), с помощью которого в момент  $\tau$  можно рассчитать апостериорную оценку ресурса

$$t_{\gamma}^{аносм} = t \int_0^t f_{аносм}(\tau) d\tau = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad (3.13)$$

и оценить величину остаточного ресурса объекта.

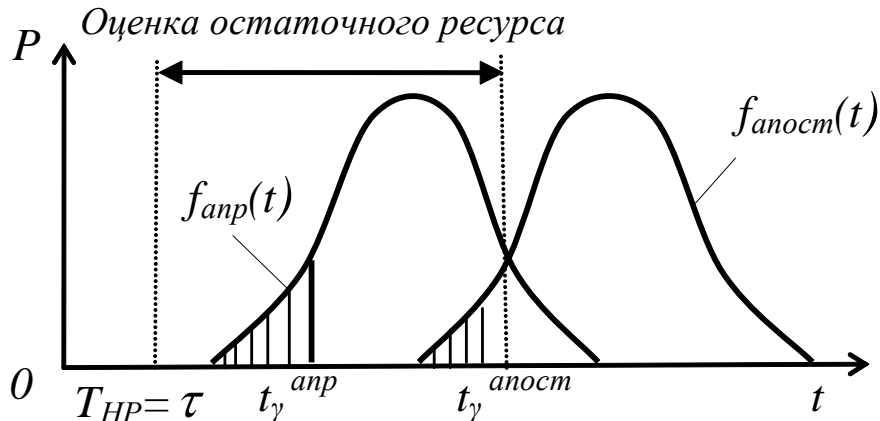


Рисунок 3.10 – Схема определения остаточного ресурса при продлении назначенного ресурса

При расчете  $t_{\gamma}^{аносм}$  неопределенность исходной информации снижается, однако полностью не устраняется. Поэтому обязательным этапом является определение как точечной, так и интервальной оценок остаточного ресурса.

Продление назначенных показателей ресурса может быть выполнено в пределах  $t_{\gamma}^{аносм H}$ , т.е. до значения нижней доверительной границы остаточного гамма-процентного ресурса (рис. 3.11).

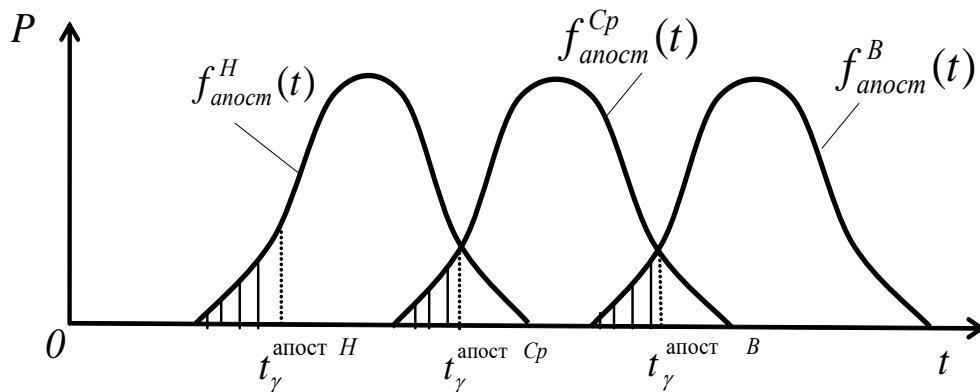


Рисунок 3.11 – Интервальная оценка остаточного ресурса при продлении назначенного ресурса

Эффективность эксплуатации при периодическом продлении ресурса во многом зависит от точности оценивания значений остаточного ресурса. Чем меньше точность, тем ближе к моменту  $\tau$  лежит нижняя доверительная граница гамма-процентного остаточного ресурса, следовательно сокращается величина максимально возможного продления ресурса. Так как ресурс приходится

продлять чаще, растут удельные затраты на обеспечение функционирования объекта при периодическом продлении ресурса. Траектория пошагового продления назначенного ресурса при разной точности прогнозов остаточного ресурса схематично показана на рис. 3.12.

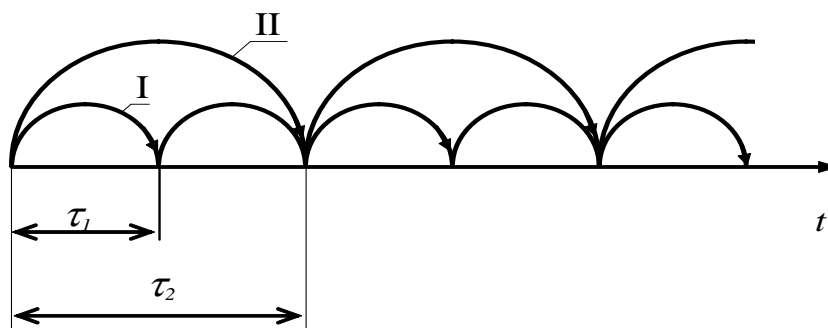


Рисунок 3.12 – Траектория пошагового продления назначенного ресурса при меньшей (I) и большей (II) точности прогнозов остаточного ресурса на сроки продления соответственно  $\tau_1$  и  $\tau_2$

Очевидно, что существует минимально допустимая величина шага продления, при которой продлять ресурс еще остается выгодным с экономической точки зрения. При дальнейшем сокращении интервала продления суммарные затраты на продление ресурса начинают превышать величину положительного эффекта от продления.

Увеличить точность оценки остаточного ресурса можно за счет совершенствования системы сбора и обработки исходных данных о фактическом техническом состоянии объекта и обоснованного выбора методов прогнозирования.

Особенности применения методов и моделей прогнозирования технического состояния по выходным и внутренним параметрам системы можно в [5].

### **3.3 Оценка надежности человека как звена сложной технической системы**

#### ***3.3.1 Понятие о надежности работы человека при взаимодействии техническими системами***

Технические системы становятся взаимосвязанными только благодаря наличию такого основного звена, как человек. Согласно данным, примерно 20-30% отказов прямо или косвенно связаны с ошибками человека; 10-15% всех отказов непосредственно связаны с ошибками человека.

Ввиду этого, анализ надежности реальных систем должен обязательно включать и человеческий фактор.

Надежность работы человека определяется как вероятность успешного выполнения им работы или поставленной задачи на заданном этапе функционирования системы в течение заданного интервала времени при определенных требованиях к продолжительности выполнения работы.

Ошибка человека определяется как невыполнение поставленной задачи (или выполнение запрещенного действия), которое может явиться причиной повреждения оборудования или имущества либо нарушения нормального хода запланированных операций.

В реальных условиях в большинстве систем независимо от степени их автоматизации требуется в той или иной мере участие человека.

Можно утверждать, что там, где работает человек, появляются ошибки. Они возникают независимо от уровня подготовки квалификации или опыта. Поэтому прогнозирование надежности оборудования без учета надежности работы человека не может дать истинной картины.

Ошибки по вине человека могут возникнуть в тех случаях, когда оператор или какое-либо лицо стремится к достижению цели ошибочно; поставленная цель не может быть достигнута из-за неправильных действий оператора; оператор бездействует в тот момент, когда его участие необходимо.

Виды ошибок, допускаемых человеком на различных стадиях взаимодействия в системе «человек – машина» можно классифицировать следующим образом:

1. Ошибки проектирования: обусловлены неудовлетворительным качеством проектирования. Например, управляющие устройства индикаторы могут быть расположены настолько далеко друг от друга, что оператор будет испытывать затруднения при одновременном пользовании ими.

2. Операторские ошибки: возникают при неправильном выполнении обслуживающим персоналом установленных процедур или в тех случаях, когда правильные процедуры вообще не предусмотрены.

3. Ошибки изготовления: имеют место на этапе производства вследствие:

- неудовлетворительного качества работы, например неправильной сварки;
- неправильного выбора материала;
- изготовления изделия с отклонениями от конструкторской документации.

4. Ошибки технического обслуживания: возникают в процессе эксплуатации и обычно вызваны некачественным ремонтом оборудования или неправильным монтажом вследствие недостаточной подготовленности обслуживающего персонала, неудовлетворительного оснащения необходимой аппаратурой и инструментами.

5. Внесенные ошибки, как правило, это ошибки, для которых трудно установить причину их возникновения, т.е. определить, возникли они по вине человека или же связаны с оборудованием.

6. Ошибки контроля: связаны с ошибочной приемкой как годного элемента или устройства, характеристики которого выходят за пределы

допусков, либо с ошибочной отбраковкой годного устройства или элемента с характеристиками в пределах допусков.

7. Ошибки обращения: возникают вследствие неудовлетворительного хранения изделий или их транспортировки с отклонением от рекомендаций изготовителя.

8. Ошибки организации рабочего места: теснота рабочего помещения, повышенная температура, шум, недостаточная освещенность и т.п.

9. Ошибки управления коллективом: недостаточное стимулирование специалистов, их психологическая несовместимость, не позволяющие достигнуть оптимального качества работы.

Свойства человека ошибаться является функцией его психологического состояния. Интенсивность ошибок во многом определяется параметрами внешней среды, в которой человек работает.

Ошибки человека можно распределить по трем уровням и на каждом уровне возможно предусмотрение ошибок. Например, на уровне 1 можно предотвратить ошибки человека; на уровне 2 можно избежать нежелательных последствий ошибок, корректируя неправильное функционирование системы вследствие ошибок, внесенных по вине человека; на уровне 3 можно исключить повторное возникновение тех или иных ситуаций, приводящих к ошибкам человека.

### ***3.3.2 Зависимость надежности работы человека от его психофизиологических свойств и уровня нагрузок***

В основе всех перечисленных причин лежат психологические мотивы поведения человека в разных ситуациях. Отдельные лица представляют и руководящее звено, и операторское звено, и ремонтный персонал, и т.п. Подходы к проблемам безопасности у них будут разные, разными будут и результаты. Поведение отдельных лиц и их влияние на безопасность систем будет различным на разных ступенях технологической цепочки создания объекта (выбор площадки, разработка технико-экономического обоснования, конструкторские проекты, изготовления оборудования, строительство объекта, монтаж, наладка, эксплуатация, контроль и т.п.).

Одновременно персонал рискованных объектов испытывает большую психологическую нагрузку. Факторами, ее обуславливающими могут быть: осознание степени опасности и тяжести последствий аварии; высокое давление пара и воды, высокое электрическое напряжение; движущиеся механизмы; вибрация; повышенная температура и пониженная влажность воздуха; монотонность обстановки; медленные изменения показаний приборов; размеренный ритм работы оборудования. Следствия: расстройство сознания, рост психологической напряженности, потеря бдительности.

Статистика показывает, что от 7 до 36% аварий происходит по вине персонала; 73% из них - в результате неблагоприятных психологических качеств человека.

Психологи определяют две группы качеств профессиональной подготовки: знания и навыки, психологические, психофизиологические и социально-психологические качества, такие, как стрессоустойчивость, выдержка, добросовестность, ответственность, умение работать в группе. Как правило, основная часть оперативного персонала этому комплексу качеств удовлетворяет. Однако здесь, видимо, требуется полное, 100% соответствие оперативного персонала этим качествам, так как неизвестно, на чью долю придется критическая ситуация, из которой придется выходить.

Не следует забывать о социально-психологическом аспекте надежности человеческого фактора в условиях политических столкновений в обществе (тревоги внешнего мира становятся фактором риска, когда у пульта обеспокоенный оператор).

Соотношение между качеством работы человека и действующими нагрузками показывает, что зависимость частоты появления ошибок от действующих нагрузок является нелинейной. При очень низком уровне нагрузок большинство операторов работают неэффективно (так задание кажется скучным и не вызывает интереса) и качество работы далеко от оптимального. При умеренных нагрузках качество работы оператора оказывается оптимальным, и поэтому умеренную нагрузку можно рассматривать как достаточное условие обеспечения внимательной работы человека-оператора. При дальнейшем увеличении нагрузок качество работы человека начинает ухудшаться, что объясняется, главным образом, такими видами физиологического стресса, как страх, беспокойство и т.п.

### ***3.3.3 Показатели надежности деятельности человека-оператора***

В общем виде деятельность человека-оператора характеризуется быстродействием и надежностью.

Показателем быстродействия является время решения задачи, время от момента реагирования оператора на поступивший сигнал момента окончания управляющих воздействий. Обычно это время прямо пропорционально количеству преобразуемой человеком информации:

$$T_{оп} = a + bN = a + \frac{N}{V_{оп}} \quad (3.14)$$

где  $a$  – скрытое – время реакции, т.е. промежуток времени от момента появления сигнала до реакции на него оператора и его значений находятся в пределах 0,2-0,6с;

$b$  – время переработки одной единицы информации (0,15-0,35 мин);

$N$  – количество перерабатываемой информации;

$V_{оп}$  – средняя скорость переработки информации (2-4 ед/с) или пропускная способность.

Пропускная способность  $V_{оп}$  характеризует время, в течении которого оператор постигает смысл информации. Зависит от его психологических особенностей, типа задач, технических и эргономических особенностей систем управления.

Надежность человека-оператора определяет его способность выполнять в полном объеме возложенные на него функции при определенных условиях работы. Надежность деятельности оператор; характеризует его безошибочность, готовность, восстанавливаемое своевременность и точность.

Безошибочность оценивается вероятностью безошибочной работ, которая определяется как на уровне отдельной операции, так и в целом. Вероятность  $P_j$  безошибочного выполнения операций  $j$ -го вида интенсивность ошибок  $\lambda_j$  допущенных при этом, применительно фазе устойчивой работы определяется на основе статистических данных:

$$P_j = \frac{N_j - N_j^{ош}}{N_j \lambda_j} = \frac{N_j^{ош}}{N_j \bar{T}_j} \quad (3.15)$$

где  $N_j$  – общее число выполняемых операций  $j$ -го вида;

$N_j^{ош}$  – допущенное число ошибок при выполнении операций  $j$ -го вида;

$\bar{T}_j$  – среднее время выполнения операции  $j$ -го вида.

Вероятность безошибочного выполнения всей операции в целом определяется при экспоненциальном распределении времени:

$$P_{оп} = \exp\left(-\sum_{j=1}^r \lambda_j \bar{T}_j k_j\right) = \exp\left(-\sum_{j=1}^r (1 - P_j) k_j\right) \quad (3.16)$$

где  $k_j$  – число выполняемых операций  $j$ -го вида;

$r$  – число различных видов операций.

Коэффициент готовности характеризует вероятность включения человека-оператора в работу в любой произвольный момент времени:

$$K_{г.оп} = 1 - \frac{T_{би}}{T_{\Sigma}} \quad (3.17)$$

где  $T_{би}$  – время, в течение которого человек не может принять поступившую к нему информацию;

$T_{\Sigma}$  – общее время работы человека-оператора.

Восстанавливаемость оператора оценивается вероятностью исправлений им допущенной ошибки:

$$P_B = P_K \cdot P_{обн} \cdot P_H \quad (3.18)$$

где  $P_K$  – вероятность выдачи сигнала системой контроля;

$P_{обн}$  – вероятность обнаружения сигнала оператором;

$P_H$  – вероятность исправления ошибочных действий при повторном выполнении всей операции.

Этот показатель позволяет оценить возможность самоконтроля оператором своих действий и исправления допущенных им ошибок.

Своевременность действий оператора оценивается вероятностью выполнения задачи в течение заданного времени:

$$P_{\text{д}} = p(t \leq t') = \int_0^{t'} f(t) dt \quad (3.19)$$

где  $f(t)$  – функция распределения времени решения задачи оператором;

$t'$  – лимит времени, превышение которого рассматривается как ошибка.

Эта же вероятность может быть определена и по статистическим данным как:

$$P_{\text{д}} = \frac{N - N_{\text{НС}}}{N} \quad (3.20)$$

где  $N$  – общее выполненное число задач;

$N_{\text{НС}}$  – несвоевременное выполненное число задач.

Точность – степень отклонения измеряемого оператором количественного параметра системы от его истинного, заданного или номинального значения.

Количественно этот параметр оценивается погрешностью, с которой оператор измеряет, устанавливает или регулирует данный параметр:

$$\Delta A = |A_{\text{И}} - A_{\text{ОП}}| \quad (3.21)$$

где  $A_{\text{И}}$  – истинное или номинальное значение параметра;

$A_{\text{ОП}}$  – фактическое измеряемое или регулируемое оператором значение этого параметра.

Значение погрешности, превысившее допустимые пределы, является ошибкой и ее следует учитывать при оценке надежности.

Точность оператора зависит: от характеристик сигнала, сложности задачи, условий и темпа работы, функционального состояния нервной системы, квалификации, утомляемости и других факторов.

### **3.3.4 Оценка надежности системы «человек-машина»**

Оценка надежности системы «человек – машина» может производиться различными методами: аналитическим, экспериментальным, имитационным. На этапах проектирования преобладают расчетные методы, которые основаны на статистических данных о надежности и скорости выполнения заданных функций оператором, с надежностью технических средств, влиянии различных факторов внешней среды на надежность техники, взаимном влиянии оператора и техники и пр.

В системотехническом методе оценки надежности «система-человек-машина» (СЧМ) человек представляется в виде компонента системы.

Необходимость разработки методов, которые позволяли бы осуществить количественную оценку надежности работы оператора и системы в целом, настоятельно диктуется потребностями практики. Наличие количественных



оценок позволяет придать объективный характер решению различного рода вопросов, которые возникают в процессе проектирования, производства и эксплуатации системы.

Анализ качественных и количественных методов оценки и прогнозирования надежности человека-оператора приводится в [19]:

В основе *метод AIR DATA* разработанным Американским институтом исследований, лежит «банк данных» по характеристикам надежности выполнения человеком отдельных операций, которые могут входить в структуру его деятельности в системе. Метод преследует следующие цели:

- прогнозирование надёжности деятельности оператора;
- выявление ошибок, допущенных на этапе проектирования;
- выдача указаний по отбору и обучению операторов.

Данные были собраны на основании 164 лабораторных психологических экспериментов и приведены в виде вероятностей безошибочного выполнения отдельных операций, минимально необходимого времени для их совершения, а также в виде временных поправок, обусловленных индивидуальными характеристиками.

Техника использования метода сводится к определению надежности выполнения задачи путем последовательного перемножения вероятностей безошибочного выполнения входящих в него отдельных операций и расчёта суммарного времени выполнения задания по временным затратам на отдельные операции. Метод применим для задач дискретного типа и основан на предположении независимости входящих в структуру задания операций.

*Метод THERP* получил наибольшее распространение. Согласно этому методу, анализ систем проводится с помощью построения вероятностного дерева, каждой ветви которого приписывается соответствующая вероятность её реализации. Вероятностное дерево для всей системы становится исключительно сложным и труднообозримым, поэтому метод применяется обычно на уровне подсистемы приблизительно для 50 ветвей и при условии довольно четкого понимания связей в системе. Исходные характеристики надежности могут браться из «банка данных», а сами расчеты возможно проводить с помощью вычислительной техники. В принципе метод позволяет учитывать как независимые, так и зависимые друг от друга операции.

Количественные методы продолжают уточняться и совершенствоваться, а некоторые из них уже сейчас дают обнадеживающие результаты. Однако, в целом, им могут быть адресованы серьезные замечания. Прежде всего это касается отсутствия проверки валидности методов, в большинстве случаев достаточно ощутимо присутствует элемент субъективизма.

У нас нет в настоящее время общепринятого метода прогнозирования и оценки надежности человека-оператора. Существует в этом смысле ряд методов, каждый из которых находит применение с учетом присущих ему ограничений.

Эволюцию взглядов и идей в отечественной инженерной психологии относительно количественных методов оценки прогнозирования надежности человека-оператора можно проследить по работам [3, 10].

В математических моделях обобщенно-структурного метода предусмотрена принципиальная возможность учёта самоконтроля оператора. Согласно принципу иерархического структурирования как одному из методических принципов обобщенно-структурного метода анализ конкретной деятельности человека-оператора осуществляется как бы «сверху вниз», с представлением её в виде структур на уровне совокупности решаемых задач (это высший уровень структурирования деятельности), затем на уровнях отдельной задачи, отдельного алгоритма, блока операций и, наконец, отдельной операции. При этом на каждом из перечисленных уровней рассмотрения применимы одни и те же критерии оценки: надёжность выполнения структуры и временные запреты на её выполнение.

Количественная же оценка целостной структуры деятельности оператора осуществляется в обратной последовательности, т.е. «снизу вверх», и поэтому уровень отдельных операций является тем исходным уровнем, на котором необходимо располагать соответствующими характеристиками надежности.

Численные значения выбранных критериев надежности человека (вероятность безошибочного выполнения отдельных операций и временные затраты на их осуществление) могут определяться либо на основании уже известных экспериментально-психологических данных, приведённых в литературе, либо путём проведения специальных испытаний на пульте управления или его макете. Усредненные характеристики надежности могут быть получены из эксперимента, поставленного на представительной выборке из соответствующей совокупности испытуемых.

Итак, исходные данные получают в специально организованных для этой цели экспериментах. Но практика психологических исследований повседневно обогащается обширным эмпирическим материалом, получаемым при изучении специальных задач. Однако, в этих экспериментах, к сожалению, не всегда используются общепринятые количественные меры. В итоге это приводит к утрате количественных данных, характеризующих психологические аспекты деятельности человека, которые могли бы найти полезное применение при решении различных задач в области теории и практики проблемы надежности человека-оператора.

При оценке надежности человека специалисты предлагают учитывать следующие факторы:

- долговременную выносливость – сохранение человеком работоспособности на заданном уровне в течение определённого времени; с нарастанием утомления надёжность снижается за счет увеличения неточностей, ошибок, снижения внимания;

- устойчивость к воздействию факторов среды: температуры, влажности, давления, шума, ускорения, связанную с состоянием нервной системы оператора;

– работоспособность в экстремальных условиях, т.е. способность принимать правильные решения при дефиците времени, в аварийных ситуациях;

– помехоустойчивость – работоспособность оператора в условиях шумов, посторонней речи, движения посторонних предметов в поле зрения; она повышается за счет приобретения опыта работы, тренировок, улучшения условий труда;

– спонтанную отвлекаемость – отвлечение внимания в результате внутренних спонтанных колебаний внимания, в первую очередь, при длительном пассивном наблюдении;

– переключаемость – время «вхождения» в новую деятельность (при этом стереотипные решения предшествующих задач могут переноситься на вновь решаемые), определяется индивидуальными особенностями каждого человека.

### 3.4 Обеспечение надежности программного обеспечения

Из всех областей программной инженерии надежность программного обеспечения (ПО) является одной из самых исследованных областей. Ей предшествовала разработка теории надежности технических (аппаратных) средств. Вопросами надежности ПО занимались как теоретики, которые, изучая природу функционирования ПО, создавали математические модели надежности, учитывающие различные аспекты функционирования ПО (возникновение ошибок, сбоев, и др.) и позволяющие оценить его реальную надежность, так и практики – разработчики ПО, которые старались различными средствами обеспечить надежность, удовлетворяющую заказчика. В результате надежность ПО формировалась как самостоятельная теоретическая и прикладная наука.

Целесообразно выделить две стороны ПО объекта:

1) **программную надежность объекта** – свойство объекта выполнять заданные функции, обусловленные качеством ПО;

2) **надежность ПО** – свойство ПО выполнять предписанные ему требования.

Программная надежность изделия проявляется при совместной работе аппаратуры и программы. Она характеризует способность изделия выполнять заданные функции при условии, что программа будет находиться в том или другом состоянии.

Надежность программного обеспечения характеризует качественное состояние программы. Ее иногда называют правильностью программы, корректностью программы, надежностью программы.

С точки зрения прикладной науки надежность ПО – это способность ПО сохранять свои свойства, преобразовывать исходные данные в результаты в течение определенного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации. Снижение надежности ПО происходит из-за ошибок в

требованиях, проектировании и выполнении. Отказы и ошибки зависят от способа производства продукта и появляются в программах при их исполнении на некотором промежутке времени. Таким образом, надежность ПО зависит от числа оставшихся и не устраненных ошибок в программах. В ходе эксплуатации ПО ошибки обнаруживаются и устраняются, и если при исправлении ошибок не вносятся новые или, по крайней мере, новых ошибок вносится меньше, чем устраняется, то в ходе эксплуатации надежность ПО возрастает. Программная надежность объекта — это то, что интересует его потребителя. Для ее обеспечения необходимо, чтобы программа была «правильной», «корректной», «надежной», т.е. чтобы она не содержала ошибок. Может оказаться, что некоторые из ошибок совсем не проявятся при работе объекта или, наоборот, при работе объекта обнаружатся дополнительные несовершенства («ошибки») программы. Однако очевидно, что необходимым условием надежной работы объекта является «корректность» программ, т.е. отсутствие в них ошибок.

Программная надежность становится особо актуальной, когда программы являются самостоятельным изделием. В этом случае они разрабатываются, изготавливаются, подвергаются испытаниям, а в дальнейшем эксплуатируются так же, как и обычные объекты.

Рассмотренные выше аспекты надежности ПО полезно иметь в виду при исследовании надежности аппаратно-программных средств (АПС).

### ***3.4.1 Отказы аппаратно-программных средств и основные проблемы исследования надежности программного обеспечения***

Любое АПС содержит как аппаратную (техническую), так и программную части [20].

Совокупность технических систем и устройств составляет аппаратную часть. Совокупность программ, ориентированных на решение комплекса задач, представляющих математическое обеспечение технической системы, образует ее программную часть (операционная система, рабочие программы пользователей и пр.).

При общем анализе надежности технической системы следует учитывать, что если аппаратная часть жестко задана, неизменна и ее надёжность может быть обеспечена на требуемом уровне, то программная часть в каждом отдельном случае может иметь ряд модификаций, является достаточно гибкой, изменяемой частью технической системы и в обеспечении совокупной надежности системы определяет наибольшее количество ошибок. Считается, что около половины отказов сложных АПС обусловлено ошибками программ, а с ростом надежности элементной базы аппаратных средств число отказов, связанных с ПО, возрастает до 90% от общего числа отказов.

Аппаратные и программные отказы АПС и имеют много общего:

- невыполнение объектом заданных функций;

- времена до отказов и времена устранения отказов носят случайный характер;

- методы обработки статистических данных об отказах одинаковы, а потому статистические оценки показателей надежности аппаратной и программной, полученные по результатам испытаний и эксплуатации, одинаковы.

Вместе с тем программные отказы существенно отличаются от отказов аппаратурных:

- отказ аппаратный зависит либо от времени, либо от объема выполненной работы, а отказ программный - от той функции, которую выполняет изделие под управлением программы (точнее, от того, с какой вероятностью программа выйдет на такой участок, который содержит ошибку);

- обнаружение и устранение аппаратного отказа (заменой отказавшего элемента исправным) не означает, что такой же отказ не повторится при дальнейшей работе АПС, а обнаружение и устранение отказа программного (исправление программы) означает, что такой отказ в дальнейшем не повторится;

- программный отказ, обнаруживаемый при автономной проверке программы, может переходить в разряд недействующих, если состояние аппаратуры делает ее нечувствительной к данному виду программного отказа. Если в программе ошибочно не предусмотрена программная защита от аппаратурного сбоя, то это программный отказ, но если при этом в аппаратуре не возникает сбоя, то отказ программный становится недействующим;

- прогнозировать возникновение аппаратных отказов сравнительно легко, а прогнозировать возникновение отдельных программных отказов трудно, а часто и невозможно (для отдельных программных отказов трудно предвидеть время, когда они становятся действующими, а когда – недействующими);

- аппаратные отказы целесообразно подразделять на внезапные и постепенные, т.е. отказы, различные по своей физической природе, законам распределения времени до отказа, методам борьбы за снижение их вероятности, а программные отказы возникают внезапно, как только программа переходит на такой участок, который содержит «ошибку». Программные отказы по природе своей не совпадают с внезапными аппаратурными отказами. Вероятность их возникновения не связана с продолжительностью работы изделия, а связана с условной вероятностью того, что программа содержит ошибку в данной части программы, и вероятностью того, что изделие будет работать под управлением этой части программы.

Основными причинами, вызывающими нарушения нормального функционирования ПО, являются:

- ошибки, скрытые в самой программе;
- искажение входной информации;
- неверные действия пользователя;

– неисправность аппаратных средств, на которой реализуется вычислительный процесс.

**Ошибки, скрытые в программе.** При разработке сложного ПО возможно возникновение ошибок, которые не всегда удастся обнаружить и ликвидировать в процессе отладки. В силу этого в программах остается некоторое количество скрытых ошибок. Они являются причиной неверного функционирования этих программ. Среди ошибок подобного рода можно выделить следующие характерные группы:

**Ошибки вычислений.** Ошибки этой группы связаны с некорректной записью или программированием математических выражений, а также неверное преобразование типов переменных. Вследствие этого получаются неправильные результаты.

**Логические ошибки.** Эта группа ошибок является причиной искажения алгоритма решения задачи. К ошибкам подобного рода можно отнести неверную передачу управления, неверное задание диапазона изменения параметра цикла, неверное условие и другие ошибки.

**Ошибки ввода-вывода.** Эти ошибки связаны с неправильным управлением ввода-вывода, формированием выходных записей, определением размера записей и другими неправильно свершенными действиями.

**Ошибки манипулирования данными.** К числу таких ошибок относятся: неверное определение числа элементов данных; неверные начальные значения, присвоенные данным; неверное указание длины операнда или имени переменной и другие ошибки.

**Ошибки совместимости** связаны с отсутствием совместимости разрабатываемого или применяемого ПО с операционной системой или другими прикладными программами.

**Ошибки сопряжений.** Группа этих ошибок вызывает неверное взаимодействие ПО с другими программами или подпрограммами, с системными программами, устройствами ЭВМ или входными данными.

**Искажение входной информации.** Указанная причина вызывает нарушение функционирования ПО, когда входные данные не попадают в допустимую область значения переменных. В этом случае возникает несоответствие между исходной информацией и возможностями программы.

**Неверные действия пользователя** связаны с неправильной интерпретацией сообщений, с неправильными действиями пользователя при работе в диалоговом режиме. Часто эти ошибки являются следствием некачественной программной документацией.

**Неисправность аппаратных средств.** Эти неисправности оказывают определенное влияние на характеристики надежности ПО. Появление отказов или сбоев в работе аппаратуры приводят к нарушению хода обработки информации и, как следствие, могут исказить как исходные данные, так и саму программу.

Следствием появления ошибок в программе является ее отказ. Последствия отказов ПО можно разделить на:

- полное прекращение выполнения функций программы;
- кратковременное нарушение хода обработки информации.

Степень серьезности последствий отказов ПО оценивается соотношением между временем восстановления программы после отказа и динамическими характеристиками объектов, использующих результаты работы этой программы.

Аварийное завершение работы прикладного ПО легко идентифицируется, так как операционная система выдает сообщения, содержащие аварийный код. Характерными причинами появления аварийного завершения являются ошибки при выполнении макрокоманды, неверное использование методов доступа, нарушение защиты памяти, нехватка ресурсов памяти, неверное использование макрокоманды, возникновение программных прерываний, для которых не указан обработчик, и другие причины.

Таким образом, к основным проблемам исследования надежности ПО следует отнести:

- 1) разработку методов оценки и прогнозирования надежности ПО;
- 2) определение факторов, влияющих на достижение заданного уровня надежности ПО;
- 3) разработку методов, обеспечивающих достижение заданного уровня надежности ПО;
- 4) совершенствование методов повышения надежности ПО на всех этапах его жизненного цикла.

### ***3.4.2 Показатели надежности программного обеспечения***

Все множество различных показателей надежности ПО можно разделить на две группы:

- количественные показатели надежности ПО;
- качественные показатели надежности ПО.

Остановимся более подробно на рассмотрении количественных показателей надежности ПО.

Наиболее удобно в качестве таких показателей использовать статистические и вероятностные показатели хорошо разработанной теории надежности радиоэлектронной аппаратуры. Следует учитывать, что оценка надежности ПО на основе статистической теории надежности аппаратуры возможна в пределах некоторых ограничений, учитывающих специфику ПО как определённого вида продукта человеческого труда.

Говоря о безотказности ПО, характеризующей способность ПО выполнять заданные функции в заданных условиях эксплуатации технической системы, будем считать, что отказ программы есть результат проявления скрытой ошибки.

Следует иметь в виду, что входные данные и данные создаваемые программой, не являются элементами ПО, поскольку их надежность связана с

работой внешних устройств и аппаратной части системы. Только константы, вводимые программистом, считаются частью ПО.

Для невозстанавливаемых в ходе эксплуатации программ обобщенной характеристикой безотказности является ВБР ПО, характеризующая вероятность того, что за время  $t$  отказа не произойдет

$$p(t) = p(\tau \geq t) \quad (3.22)$$

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  и среднее время наработки до отказа (среднее время безотказной работы)  $M_t$  ПО определяют по формулам:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = -\frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt} = \frac{d(\ln p(t))}{dt} \quad (3.23)$$

$$M_t = \int_0^{\infty} p(t) dt \quad (3.24)$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы  $p(t) = e^{-\lambda t}$  и  $M_t = \frac{1}{\lambda}$ .

Поскольку программы имеют явно выраженные производственные циклы работы, то наработка программы может быть выражена либо через календарное время, либо через машинное время, либо через количество отработанных операторов, решённых задач и т.п.

Один из способов оценки  $M_t$  – наблюдение за поведением программы в определённый временной период. Тогда величину среднего времени между отказами (сбоями) ПО можно определить так

$$M_t = \frac{T}{n-r} \quad (3.25)$$

где  $T$  – общее количество времени успешного прогона программы, определяемое по выражению

$$T = \sum_{i=1}^r t_i + \sum_{j=1}^n t_j \quad (3.26)$$

где  $t_i$  – время непрерывного прогона при безошибочной работе ПО;

$t_j$  – время прогона до появления ошибки ПО;

$n$  – общее количество прогонов ПО;

$r$  – количество прогонов ПО без ошибок.

Полагая количество ошибок постоянным, можно вычислить приведенные интенсивность отказов  $\lambda'$  и среднее время между отказами ПО  $M'_t$ :

$$\lambda' = \frac{l}{T} \quad (3.27)$$

$$M'_t = \frac{T}{l} \quad (3.28)$$

где  $l$  – количество прогонов ПО с ошибками ( $l = n - r$ ).

Классифицируя отказы ПО по видам отказов – аппаратные, программные, оператора и т.д., можно определить частные (взвешенные) интенсивности отказов по соответствующим видам ошибок –  $\lambda'_{an}$ ,  $\lambda'_{np}$ ,  $\lambda'_{on}$  и т.д., а общая



надежность определяется как сумма таких интенсивностей. Такой подход может значительно облегчить сбор статистических данных по соответствующим видам отказов на основе независимого анализа программных изделий различных типов.

В случае, если в ходе эксплуатации возможна корректировка ПО или восстановление программы после отказа, вызванного действием помех (сбоев) от внепрограммных источников, а время восстановления достаточно мало по сравнению с временем между отказами или сбоями, обобщающей характеристикой безотказности ПО является интенсивность потока отказов во времени  $\omega(t)$

$$\omega(t) = \frac{d\bar{T}(t)}{dt} \quad (3.29)$$

где  $\bar{T}(t)$  – среднее число отказов за время  $t$ .

Тогда среднее время наработки между двумя отказами можно вычислить по выражению

$$\bar{T}_\omega = \frac{t}{\bar{T}(t)} \quad (3.30)$$

Для программ, время корректировки которых сравнимо с временем между отказами, обобщающей характеристикой безотказности является функция готовности  $\Gamma(t)$ , которая характеризует вероятность застать программное изделие в заданный момент времени в работоспособном состоянии.

Способность программного изделия выполнять заданные функции в условиях действия помех (ошибок, сбоев, отказов), возникающих во внепрограммных источниках (техническое обеспечение, исходные данные и пр.) определяется **устойчивостью ПО**. При оценке устойчивости ПО должны быть заданы параметры окружающей среды, по отношению к которой оценивается устойчивость программ.

**Показатель устойчивости** — это показатель безотказности, но с использованием условных вероятностей. Условием, при котором вычисляются вероятности, является отказ (сбой) в программе или аппаратуре. Для невозстанавливаемых (некорректируемых) программ обобщенным показателем устойчивости служит условная вероятность безотказной работы

$$p_{\text{усл}}(t) = p(\tau \geq t) \cdot p(A) \quad (3.31)$$

где  $p(A)$  – вероятность ошибки (сбоя) программы или отказа аппаратуры.

**Показатели ремонтпригодности ПО** характеризуют приспособленность ПО к поиску и устранению ошибок и внесению в него изменений в процессе эксплуатации. Для ПО данные показатели называют **показателями корректируемости ПО**. Они используются для характеристики восстанавливаемых в ходе эксплуатации программ, к ним относятся:

$p_k(t) = p(\tau_k \leq t)$  – вероятность корректировки за заданное время;

$\bar{T}_k$  – среднее время корректировки ПО;

$\omega_k(t)$  – параметр потока корректировок.

*Для ПО показатель долговечности* характеризует свойства программ избегать морального старения при длительном использовании. При этом может использоваться *показатель защищенности ПО* от посторонних вмешательств в его работу. Долговечность ПО определяется временем отказа ПО вследствие морального старения, а защищенность – вероятностью внесения искажений при постороннем вмешательстве.

В зависимости от условий применения ПО можно выделить три режима (типа) его работы:

1) программа не корректируется, и любой отказ является полным, т.е. после отказа ПО не восстанавливается. Основные показатели надежности для этого режима работы программ - безотказность, устойчивость и защищенность.

2) программа не корректируется, однако после отказа ПО система продолжает функционировать нормально. Основные показатели надежности - безотказность, устойчивость, защищённость и долговечность.

3) после каждого отказа ПО корректируется, отлаживается и только после этого снова продолжается ее эксплуатация. Основные показатели надёжности - безотказность, устойчивость, корректируемость, защищенность.

### ***3.4.3 Проверка и испытания программ***

Испытания программ на надежность и испытания изделий на надежность их программного обеспечения – обязательные этапы при проверке надежности систем.

Испытания с целью проверки надежности программ осуществляются с помощью специальных программ (тестирование) и специальных (имитационных) стендов. Проверяется при этом степень отработанности программы и ее соответствие заданным требованиям.

Испытания с целью проверки надежности изделий, работающих под управлением программ, осуществляются при совместной работе программы и изделия. Проверяются при этом и степень отработанности программы в соответствии с заданными требованиями, и корректность этих требований, и согласованность взаимодействий программы и аппаратуры.

Степень отработанности программы может проверяться различными методами. Чем выше требование к достоверности проверки, тем более сложен метод проверки.

Рассмотрим один из наиболее простых методов. В процессе проверки «корректности» программы (с помощью наблюдений за работой либо изделия, либо имитирующего устройства, либо на специальном стенде с помощью тестов) фиксируются времена обнаружения ошибок в программе. Результаты проверки обрабатываются при следующих предположениях:

1) ошибки программы независимы. Каждый раз после обнаружения они устраняются и в дальнейшем не проявляются;

2) интенсивность ошибок  $\lambda$  уменьшается по мере их обнаружения и устранения ступенчато (рис. 3.13).

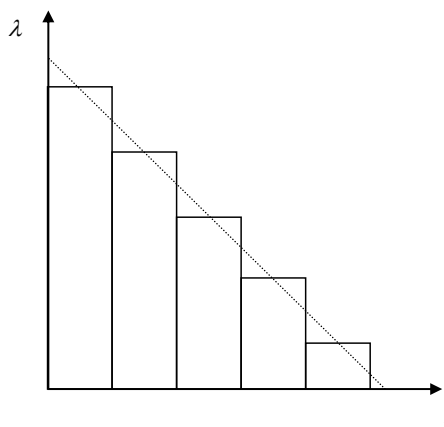


Рисунок 3.13 – График изменения интенсивности ошибок

Статистическая интенсивность программных ошибок определяется так же, как интенсивность аппаратных отказов по формуле

$$\tilde{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot n(t)} \quad (3.32)$$

где  $n(t)$  - число идентичных программ, не отказавших к моменту времени  $t$ ;

$\Delta n(t)$  - число отказавших идентичных программ на интервале  $(t; t + \Delta t)$ .

Выявление и устранение ошибок производится до тех пор, пока значение  $\tilde{\lambda}(t)$  будет меньше допустимого (заданного) значения  $\lambda^0$ . Допустимое значение  $\lambda^0$  назначается с учетом требований к надежности изделия. Ориентировочно можно исходить из того, что интенсивность программных ошибок, приводящих к отказу, на этапе отладочных испытаний должна быть не больше интенсивности аппаратных отказов.

Положение о том, что при создании программного обеспечения больших систем возможно возникновение ошибок и что выявление программных ошибок - чрезвычайно трудная задача, не только не должно обезоруживать разработчиков систем, а наоборот, должно ориентировать их на максимальное сосредоточение сил для ликвидации программных отказов.

#### **3.4.4 Надежность сложных комплексов программ**

Для оценки надежности программ, как и при исследовании характеристик аппаратуры, как правило, приходится ограничиваться интегральными показателями наработки на отказ и средним временем восстановления. Определение остальных показателей сопряжено с большими трудностями, которые обусловлены тем, что для определения показателей надежности комплексов программ необходимы длительные эксперименты или сложные расчеты при определенных исходных данных.

Оценка достоверности результатов и надежности функционирования комплекса программ представляет собой сложную задачу из-за «проклятия размерности». Естественным становится статистический подход к анализу надежности функционирования и статистическая оценка достоверности результатов. Качество отладки определяется интенсивностью отказов и значениями ошибок в выходных результатах, полученными за счет не выявленных ошибок в программах и искажений исходных данных. Интенсивность отказов в комплексе программ иначе называется, как частота проявления ошибок в комплексе программ.

Точное определение полного количества ошибок в программе прямыми методами измерения невозможно. Имеются только косвенные пути статистической оценки их полного количества. Такие оценки базируются на построении математических моделей в предположении жесткой корреляции между общим количеством и проявлениями ошибок в комплексе программ после его отладки в течении времени  $\tau$ , т.е. между следующими параметрами:

- суммарным количеством ошибок  $N_0$  в комплексе программ,
- количеством ошибок, выявляемых в единицу времени  $\frac{dn}{d\tau}$  в процессе тестирования и отладки при постоянных усилиях на их проведение;
- интенсивностью отказов  $\lambda$  или числом искажений результатов на выходе комплекса программ вследствие не выявленных ошибок при нормальном функционировании системы в единицу времени.

### ***3.4.5 Математические модели надежности комплексов программ***

Математические модели позволяют оценивать характеристики ошибок в программах и прогнозировать их надежность при создании и эксплуатации. Модели имеют вероятностный характер, и достоверность прогнозов зависит от точности исходных данных и глубины прогнозирования по времени. Эти математические модели предназначены для оценки:

- показателей надежности комплексов программ в процессе отладки;
- количества ошибок, оставшихся не выявленными;
- времени, необходимого для обнаружения следующей ошибки в функционирующей программе;
- времени, необходимого для выявления всех ошибок с заданной вероятностью.

Использование моделей позволяет эффективно проводить отладку и испытания комплексов программ, помогает принять рациональное решение о времени прекращения отладочных работ.

В настоящее время используется множество различных математических моделей, основными из которых являются:

- 1) экспоненциальная модель изменения ошибок в зависимости от времени отладки;
- 2) модель, учитывающая дискретно - понижающуюся частоту появления ошибок как линейную функцию времени тестирования и испытаний;
- 3) модель, базирующаяся на распределении Вейбула;
- 4) модель, основанная на дискретном гипергеометрическом распределении.

При обосновании математических моделей выдвигаются некоторые гипотезы о характере проявления ошибок в комплексе программ.

Наиболее обоснованными представляются предположения, на которых базируется *первая экспоненциальная модель* изменения ошибок в процессе отладки и которые заключаются в следующем:

- 1) любые ошибки в программе являются независимыми и проявляются в случайные моменты времени;
- 2) время работы между ошибками определяется средним временем выполнения команды на данного аппаратного средства и средним числом команд, исполняемым между ошибками. Это означает, что интенсивность проявления ошибок при реальном функционировании программы зависит от среднего быстродействия аппаратного средства;
- 3) выбор отладочных тестов должен быть представительным и случайным, с тем чтобы исключить концентрацию необнаруженных ошибок для некоторых реальных условий функционирования программы;
- 4) ошибка, являющаяся причиной искажения результатов, фиксируется и исправляется после завершения тестирования либо вообще не обнаруживается.

Из этих свойств следует, что при нормальных условиях эксплуатации количество ошибок, проявляющихся в некотором интервале времени, распределено по закону Пуассона. В результате длительность непрерывной работы между искажениями распределена экспоненциально.

Предположим, что в начале отладки комплекса программ при  $\tau = 0$  в нем содержалось  $N_0$  ошибок. После отладки в течении времени  $\tau$  осталось  $n_0$  ошибок и устранено  $n$  ошибок ( $N_0 = n_0 + n$ ). При этом время  $\tau$  соответствует длительности исполнения программ на вычислительной системе (ВС) для обнаружения ошибок и не учитывает простои машины, необходимые для анализа результатов и проведения корректировок.

Интенсивность обнаружения ошибок в программе  $\frac{dn}{d\tau}$  и абсолютное количество устранённых ошибок связываются уравнением

$$\frac{dn}{d\tau} + kn = kN_0, \quad (3.33)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Если предположить, что в начале отладки при  $\tau = 0$  отсутствуют обнаруженные ошибки, то решение уравнения (3.33) имеет вид

$$n = N_0(1 - e^{-k\tau}) \quad (3.34)$$

а количество оставшихся ошибок в комплексе программ

$$n_0 = N_0 - n = N_0 e^{-k\tau} \quad (3.35)$$

и пропорционально интенсивности обнаружения  $\frac{dn}{d\tau}$  с точностью до коэффициента  $k$ .

Среднее время безотказной работы программ до отказа или наработка на отказ, который рассматривается как обнаруживаемое искажение программ, данных или вычислительного процесса, нарушающее работоспособность, равно величине, обратной интенсивности обнаружения отказов (ошибок)

$$\bar{T} = \frac{1}{dn/d\tau} = \frac{e^{k\tau}}{kN_0} \quad (3.36)$$

Если учесть, что до начала тестирования в комплексе программ содержалось  $N_0$  ошибок и этому соответствовала наработка на отказ  $\bar{T}_0$ , то функцию наработки на отказ от длительности проверок можно представить в следующем виде

$$\bar{T} = \bar{T}_0 \cdot \exp\left(\frac{\tau}{N_0 \bar{T}_0}\right) \quad (3.37)$$

Если известны моменты обнаружения ошибок  $t_i$  и каждый раз в эти моменты обнаруживается и достоверно устраняется одна ошибка, то, используя метод максимального правдоподобия, можно получить уравнение для определения значения начального числа ошибок  $N_0$ :

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{N_0 - (i-1)} = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i}{N_0 \sum_{i=1}^n t_i - \sum_{i=1}^n (i-1)t_i} \quad (3.38)$$

а также выражение для расчета коэффициента пропорциональности

$$k = \frac{n}{N_0 \sum_{i=1}^n t_i - \sum_{i=1}^n (i-1)t_i} \quad (3.39)$$

В результате можно рассчитать число оставшихся в программе ошибок и среднюю наработку на отказ, т.е. получить оценку времени до обнаружения следующей ошибки.

Если в процессе отладки и испытаний программ для повышения наработки на отказ от значения  $\bar{T}_1$  до  $\bar{T}_2$  необходимо обнаружить и устранить  $\Delta n$  ошибок, то величина  $\Delta n$  определяется соотношением

$$\Delta n = N_0 \bar{T}_0 \left( \frac{1}{\bar{T}_1} - \frac{1}{\bar{T}_2} \right) \quad (3.40)$$

Выражение для определения затрат времени  $\Delta\tau$  на проведение отладки, которые позволяют устранить  $\Delta n$  ошибок и соответственно повысить наработку на отказ от значения от  $\bar{T}_1$  до  $\bar{T}_2$ , имеет вид:

$$\Delta\tau = \frac{N_0 \bar{T}_0}{k} \ln\left(\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1}\right) \quad (3.41)$$

**Вторая модель** построена на основе гипотезы о том, что частота проявления ошибок (интенсивность отказов) линейно зависит от времени испытания  $t_i$  между моментами обнаружения последовательных  $i$  и  $(i-1)$  ошибок.

$$\lambda(t_i) = k[N_0 - (i-1)]t_i \quad (3.42)$$

где  $N_0$  - начальное количество ошибок;

$k$  - коэффициент пропорциональности, обеспечивающий равенство единице площади под кривой вероятности обнаружения ошибок.

Для оценки наработки на отказ получается выражение, соответствующее распределению Релея:

$$p(t_i) = \exp\left(-k[N_0 - (i-1)]\frac{t_i^2}{2}\right) \quad (3.43)$$

где  $p(t_i) = p(\tau \geq t_i)$ .

Отсюда плотность распределения времени наработки на отказ

$$f(t_i) = -\frac{dp(t_i)}{dt_i} = k[N_0 - (i-1)]t_i \exp\left(-k[N_0 - (i-1)]\frac{t_i^2}{2}\right) \quad (3.44)$$

Используя функцию максимального правдоподобия, получим оценку для общего количества ошибок  $N_0$  и коэффициента  $k$

$$N_0 = \left(\frac{2n}{k} + \sum_{i=1}^n (i-1)t_i^2\right) \frac{1}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (3.45)$$

$$k = \left(\sum_{i=1}^n \frac{2}{N_0 - (i-1)}\right) \frac{1}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (3.46)$$

Особенностью **третьей модели** является учет ступенчатого характера изменения надёжности при устранении очередной ошибки. В качестве основной функции рассматривается распределение времени наработки на отказ. Если ошибки не устраняются, то интенсивность отказов является постоянной, что приводит к экспоненциальной модели для распределения:

$$p(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.47)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.48)$$

Для аппроксимации изменения интенсивности от времени при обнаружении и устранении ошибок используется функция следующего вида

$$\lambda(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (3.49)$$

Если  $0 < \beta < 1$ , то интенсивность отказов снижается по мере отладки или в процессе эксплуатации. При таком виде функции плотность  $\lambda(t)$  функции распределения наработки на отказ описывается двухпараметрическим

распределением Вейбулла, которое достаточно хорошо отражает реальные зависимости при расчете функции наработки на отказ:

$$f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \cdot \exp(-\lambda t^\beta) \quad (3.50)$$

### 3.5 Обеспечение метрологической надежности информационно-измерительных комплексов

#### 3.5.1 Классификация отказов средств измерений

В процессе эксплуатации метрологические характеристики (МХ) и параметры средства измерений (СИ) претерпевают изменения. Эти изменения носят случайный монотонный или флуктуирующий характер и приводят к отказам, т.е. к невозможности СИ выполнять свои функции. Отказы делятся на не метрологические и метрологические.

**Не метрологическим** называется отказ, обусловленный причинами, не связанными с изменением МХ средства измерений. Они носят главным образом явный характер, проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения поверки.

**Метрологическим** называется отказ, вызванный выходом МХ из установленных допустимых границ. Как показано в [15], метрологические отказы происходят значительно чаще, чем не метрологические. Это обуславливает необходимость разработки специальных методов их прогнозирования и обнаружения. Метрологические отказы подразделяются на внезапные и постепенные.

**Внезапным** называется отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одной или нескольких МХ. Эти отказы в силу их случайности невозможно прогнозировать. Их последствия (сбой показаний, потеря чувствительности и т.п.) легко обнаруживаются в ходе эксплуатации прибора, т.е. по характеру проявления они являются явными. Особенностью внезапных отказов является постоянство во времени их интенсивности. Это дает возможность применять для анализа этих отказов классическую теорию надежности. В связи с этим в дальнейшем отказы такого рода не рассматриваются.

**Постепенным** называется отказ, характеризующийся монотонным изменением одной или нескольких МХ. По характеру проявления постепенные отказы являются скрытыми и могут быть выявлены только по результатам периодического контроля СИ.

Специфика проблемы метрологической надежности состоит в том, что для нее основное положение классической теории надежности о постоянстве во времени интенсивности отказов оказывается неправомерным. Современная теория надежности ориентирована на изделия, обладающие двумя характерными состояниями: работоспособное и неработоспособное. Постепенное изменение погрешности СИ позволяет ввести сколь угодно много



работоспособных состояний с различным уровнем эффективности функционирования, определяемым степенью приближения погрешности к допустимым граничным значениям.

Понятие метрологического отказа является в известной степени условным, поскольку определяется допуском на МХ, который в общем случае может меняться в зависимости от конкретных условий. Важно и то, что зафиксировать точное время наступления метрологического отказа ввиду скрытого характера его проявления невозможно, в то время как явные отказы, с которыми оперирует классическая теория надежности, могут быть обнаружены в момент их возникновения.

### ***3.5.2 Метрологическая надежность средств измерений***

***Метрологическая надежность*** – это свойство средств измерений сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение определенного времени при нормальных режимах и рабочих условиях эксплуатации.

Надежность СИ характеризует его поведение с течением времени и является обобщенным понятием, включающим в себя стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность (для восстанавливаемых СИ) и сохраняемость.

***Стабильность*** СИ является качественной характеристикой, отражающей неизменность во времени его МХ. Она описывается временными зависимостями параметров закона распределения погрешности. Метрологическая надежность и стабильность являются различными свойствами одного и того же процесса старения СИ. Стабильность несет больше информации о постоянстве метрологических свойств средства измерений. Это как бы его «внутреннее» свойство. Надежность, наоборот, является «внешним» свойством, поскольку зависит как от стабильности, так и от точности измерений и значений используемых допусков.

***Безотказность*** называется свойство СИ непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени. Она характеризуется двумя состояниями: работоспособным и неработоспособным. Однако для сложных измерительных систем может иметь место и большее число состояний, поскольку не всякий отказ приводит к полному прекращению их функционирования. Отказ является случайным событием, связанным с нарушением или прекращением работоспособности СИ. Это обуславливает случайную природу показателей безотказности, главным из которых является распределение времени безотказной работы СИ.

***Долговечность*** называется свойство СИ сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния.

***Работоспособное состояние*** – это такое состояние СИ, при котором все его МХ соответствуют нормированным значениям.

**Предельным** называется состояние СИ, при котором его применение недопустимо.

После метрологического отказа характеристики СИ путем соответствующих регулировок могут быть возвращены в допустимые диапазоны. Процесс проведения регулировок может быть более или менее длительным в зависимости от характера метрологического отказа, конструкции СИ и ряда других причин. Поэтому в характеристику надежности введено понятие «ремонтпригодность».

**Ремонтпригодность** — свойство СИ, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, восстановлению и поддержанию его работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Оно характеризуется затратами времени и средств на восстановление СИ после метрологического отказа и поддержание его в работоспособном состоянии.

Процесс изменения МХ идет непрерывно независимо от того, используется ли СИ или оно хранится на складе. Свойство СИ сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования называется его **сохраняемостью**.

Для большого числа промышленно выпускаемых электрических и радиотехнических элементов средств измерений имеются специальные таблицы, в которых указывается интенсивность их отказов — количество отказов в единицу времени. Если — таких данных нет, то их можно получить экспериментальным путем в результате испытания элементов СИ на надежность. Тогда интенсивность отказа элемента вычисляется по формуле

$$\tilde{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot n(t)} \quad (3.51)$$

где  $n(t)$  — число идентичных элементов, не отказавших к моменту времени  $t$ ;

$\Delta n(t)$  — число отказавших идентичных элементов на интервале  $(t; t + \Delta t)$ .

Зная интенсивность отказов каждого элемента, можно определить интенсивность отказов средства измерений, состоящего из этих элементов:

$$\tilde{\lambda}_z = \sum_{i=1}^n \tilde{\lambda}_i m_i \quad (3.52)$$

где  $n$  — количество типов элементов, входящих в состав СИ;

$m_i$  — количество элементов  $i$ -го типа.

Когда речь идет о внезапных отказах, вероятность безотказной работы определяется как

$$p(t) = e^{-\tilde{\lambda}_z t} \quad (3.53)$$

а наработка на отказ (среднее время безотказной работы)

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{\tilde{\lambda}_z}$$

(3.54)

По характеру своего проявления внезапные отказы являются явными. Они сравнительно легко обнаруживаются и после выяснения их причин – устраняются. Сложнее дело обстоит с диагностикой так называемых постепенных отказов, которые заключаются в том, что с течением времени метрологические характеристики перестают соответствовать установленным для них нормам, и средство измерений вследствие этого становится непригодным. Такие отказы являются скрытыми и могут быть обнаружены только при очередной поверке средства измерений, поэтому межповерочные интервалы устанавливаются исходя из метрологической надежности средств измерений. Метрологические отказы являются следствием старения и износа элементов и узлов средств измерений, так что их интенсивность со временем возрастает.

На практике межповерочные интервалы устанавливаются исходя из следующей формулы

$$T_{МП} = \frac{\ln(1 - P_{МО})}{\ln P_M(t)} \quad (3.55)$$

где  $P_M(t)$  – вероятность безотказной в метрологическом смысле работы;

$P_{МО}$  – вероятность метрологического отказа за время между поверками.

Значение вероятности метрологического отказа за время между поверками  $P_{МО}$  можно выбрать, используя таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Значения вероятности метрологического отказа

Для средств измерений, используемых при	Значение вероятности метрологического отказа
технических измерениях	0,2...0,1
передаче информации о размере единиц	0,15...0,05
особо важных, ответственных измерениях	0,05...0,01

### ***3.5.3 Проблемы обеспечения метрологической надежности информационно-измерительных комплексов***

В настоящее время обеспечение качества промышленной продукции невозможно без использования ИИК, которые позволяют получать количественную информацию о множестве параметров изделий и технологических процессов. При этом современный ИИК может состоять из нескольких сотен измерительных каналов (ИК), предназначенных для контроля в реальном времени различных физических величин.

Основными показателями технического совершенства ИИК является уровень их метрологических характеристик и метрологической надежности. Для обеспечения требуемых значений этих показателей в настоящее время прослеживаются две тенденции:

1) качественное улучшение точностных свойств составляющих ИИК компонентов при одновременном уменьшении трудоёмкости обслуживания системы;

2) усложнение алгоритмов обработки измерительной информации с использованием АПС при ее сборе, обработке и хранении.

Развитие этих тенденций неизбежно приводит к необходимости совершенствовать подходы к эксплуатации этих систем и, в первую очередь, к обеспечению их метрологической надежности, так как существующие нормативные методы в этой области не всегда отвечают практическим задачам. В частности, проведение поверочных и калибровочных работ, являющихся основой обеспечения метрологической надежности ИИК, приводит к организационным и техническим проблемам. Например, не всегда возможно демонтировать для поверки (калибровки) ИИК или его основные элементы, а также остановить технологический процесс, контролируемый с помощью ИИК (или оставить его бесконтрольным). Кроме того, использование эталонных средств измерений непосредственно в производственных условиях, как правило, затруднено. Вместе с тем, большинство исследований, практических рекомендаций, нормативных документов, разработок и пр. направлены на повышение метрологической надежности ИИК в процессе их разработки и изготовления. Учитывая, что количество разработчиков и производителей ИИК значительно меньше, чем количество их эксплуатационников, мероприятия, направленные на повышение именно эксплуатационной метрологической надежности, могут дать наибольший практический результат.

Таким образом, исследование и совершенствование методов и средств обеспечения эксплуатационной метрологической надежности ИИК в производственных условиях представляется проблемной и актуальной задачей.

Метрологическая надежность каждого измерительного канала ИИК и всего комплекса в целом в настоящее время строится на повышении требований к стабильности метрологических характеристик отдельных элементов этой системы. И метрологическое обслуживание осуществляется с позиций, общепринятых для отдельных средств измерений без учета системной специфики конкретного ИИК, обслуживаемого им технологического процесса и условий эксплуатации. При этом не учитывается совокупность свойств ИИК, которая определяет сложное поведение системы при изменении метрологических характеристик ее отдельных элементов. Кроме того, учитывая, что ИИК является элементом управления качеством контролируемого технологического процесса, то ее эффективность действия зависит не только от метрологических свойств, но и от коэффициента готовности ИИК. Таким образом, рассмотрение с системных позиций ИИК как совокупности взаимодействующих ИК и установлении обобщенных информационно-метрологических свойств ИИК, обеспечивающих его метрологическую надежность и эффективность технологического процесса, является еще одной из проблемных задач.

Одним из основных свойств ИИК, которое может быть использовано для

повышения его метрологической надежности, является многоканальность и информационная взаимокорреляция внутри групп ИК, имеющих некоторые факторы, функционально (не стохастически) связывающие изменения параметров, измеряемых в этих ИК. Для выявления этих свойств устанавливаются:

1) корреляционные связи между ИК, имеющими общий фактор для измерения как однородных, так и разнородных измеряемых физических величин;

2) значения поправок результатов измерений во взаимокоррелированных ИК и прогнозируемой скорости потери точности каждого из этих ИК;

3) мероприятия по обеспечению коэффициента готовности ИИК, необходимого для эффективного управления технологическим процессом, обслуживаемым этим комплексом. Традиционное обеспечение метрологической надежности ИИК наряду с тщательным соблюдением всех предписанных условий эксплуатации как ИИК, так и его отдельных элементов, в конечном счете, сводится к проведению проверок. При этом конкретные значения межповерочных интервалов определяют на основе теоретико-вероятностных подходов, т.е. на оценке частоты потери точности или длительности ее сохранения в период между поверками, что обычно предполагает значительное количество подобных ИИК, эксплуатируемых в сходных условиях и обслуживающих однотипные технологические процессы, а также статистическую независимость ИК. Однако ИИК часто предназначены для получения информации об уникальных технологических процессах, а сигналы ИК взаимокоррелированы, так как контролируемый технологический процесс создает во всех (или, во всяком случае, в определённых группах) ИК функционально связанную составляющую. Взаимокоррелированными будут не только сигналы, но и помехи, вызванные мешающими воздействиями, в том числе и связанные с деградацией точности ИК с течением времени. Ввиду появления новых технических возможностей, связанных с широким использованием вычислительной техники и усложненных алгоритмов обработки измерительной информации, появились предпосылки для упрощения обеспечения метрологической надежности и увеличения коэффициента готовности ИИК. Для реализации данного подхода необходимы соответствующей модели повышения метрологической надежности ИИК и соответствующие алгоритмы обработки информации во взаимокоррелированных ИК. Что и составляет следующую проблемную задачу.

При традиционном подходе метрологическая надежность обеспечивается путем оперативного установления в нормативные сроки обычно при профилактическом и капитальном ремонте и (или) периодической диагностике ИИК. Такой подход, как правило, требует существенных затрат временных и материальных ресурсов и часто к формальной имитации соответствующих работ. Вместе с тем более логично проведение профилактических регулировочных ремонтных и т.п. работ исходя из фактического значения метрологических характеристик ИИК.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что относится к техническим средствам обеспечения надежности?
2. По каким признакам классифицируются математические модели, позволяющие прогнозировать техническое состояние системы и ее составных частей?
3. В каких целях проводится оценка качества прогнозирования?
4. Что понимается под продлением назначенных показателей ресурса (срока службы) системы?
5. Каким образом классифицируются виды ошибок, допускаемых человеком на различных стадиях взаимодействия в системе «человек – машина»?
6. Чем оценивается своевременность действий оператора?
7. Что такое остаточный ресурс?
8. Какие исходные данные необходимы для прогнозирования остаточного ресурса?
9. Что понимается под надежностью программного обеспечения?
10. Что такое устойчивость ПО?
11. Определите основные причины отказов ПО.
12. Какие существуют пути повышения надежности ПО?
13. Что понимается под метрологической надежностью и метрологическим отказом?
14. Исходя из чего устанавливают межповерочные интервалы средств измерений?

### Список литературных источников для самостоятельного изучения

1. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 590 с.
2. Садыхов Г.С. Показатели остаточной долговечности и их оценки в задачах продления сроков эксплуатации технических объектов. – М.: Знание, 1986. – 52с.
3. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005. – 478 с.

## Список литературы

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 234 с.
2. Баруча-Рид А.Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
3. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. –Л.: Наука, 1982 – 270 с.
4. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы.  
– М: Наука, 1973 – 228 с.
5. Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. – СПб.: Лань, 2011. – 352 с.
6. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984. – 318 с.
7. Гихман И.И., Скороход А.В. Введение в теорию случайных процессов.  
– М.: Наука, 1977. –568 с.
8. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Теория распределений. – М.: Наука, 1966 – 588 с.
9. Колмогоров А.Н., Драгалин А.Г. Математическая логика.// Изд. 3-е, стереотипное – М.: Ком. Книга, 2006. – 240 с.
10. Ломов Б.Ф. Человек и техника. – М.: Сов. радио, 1966. – 464 с.
11. Можаяев А.С., Гладкова И.А. Библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛОГ&ВФ). Свидетельство об официальной регистрации № 2003611100. – М.: РОСПАТЕНТ РФ, 12 мая 2003.
12. Половко А.М., Гуров С.В.: Основы теории надежности. - 2 изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
13. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем.  
– СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

14. Теория прогнозирования и принятия решений /С.А. Саркисян, В.И. Каспин, В.А. Лисичкин и др.; Под ред. С.А. Саркисяна. – М.: Высш. школа, 1977. – 351 с.
15. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 590 с.
16. Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
17. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалевский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры/Под ред. Т.А. Голинкевича. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с.
18. Садыхов Г.С. Показатели остаточной долговечности и их оценки в задачах продления сроков эксплуатации технических объектов. – М.: Знание, 1986. – 52с.
19. Ж. Кристенсен, Д. Мейстер, П. Фоули и др. Человеческий фактор. Том 1. Эргономика-комплексная научно-техническая дисциплина. – М.: Мир, 1991. – 599 с.
20. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005. – 478 с.
21. ГОСТ 19919-74 Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения.
22. ГОСТ В 25883-83 Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения.
23. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.
24. ГОСТ 27.003-2016 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
25. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
26. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
27. ГОСТ Р 51901.5-2005 Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.



28. ГОСТ Р МЭК 61078-2021 Надежность в технике. Структурная схема надежности (МЭК 61078:2016 «Структурная схема надежности» (IEC 61078:2016 «Reliability block diagrams», IDT)
29. ГОСТ Р МЭК 61165—2019 Надежность в технике. Применение марковских методов (МЭК 61165:2006 «Применение марковских методов» (IEC 61165:2006 «Application of Markov techniques», IDT).
30. ГОСТ Р 27.303-2021. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. (МЭК 60812:2018 «Анализ видов и последствий отказов» (IEC 60812:201 «Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)», MOD).

**Приложение А**  
**Таблица значений интегральной функции Лапласа**

$$\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{u^2}{2}} dU$$

<i>U</i>	$\Phi(U)$	<i>U</i>	$\Phi(U)$	<i>U</i>	$\Phi(U)$	<i>U</i>	$\Phi(U)$	<i>U</i>	$\Phi(U)$
0,00	0,0000	0,54	0,2054	1,08	0,3599	1,62	0,4474	2,32	0,4898
0,02	0,0080	0,56	0,2123	1,10	0,3643	1,64	0,4495	2,36	0,4909
0,04	0,0160	0,58	0,2190	1,12	0,3686	1,66	0,4515	2,40	0,4918
0,06	0,0239	0,60	0,2257	1,14	0,3729	1,68	0,4535	2,44	0,4927
0,08	0,0319	0,62	0,2324	1,16	0,3770	1,70	0,4554	2,48	0,4934
0,10	0,0398	0,64	0,2389	1,18	0,3810	1,72	0,4573	2,52	0,4941
0,12	0,0478	0,66	0,2454	1,20	0,3849	1,74	0,4591	2,56	0,4948
0,14	0,0557	0,68	0,2517	1,22	0,3883	1,76	0,4608	2,60	0,4953
0,16	0,0636	0,70	0,2580	1,24	0,3925	1,78	0,4625	2,64	0,4959
0,18	0,0714	0,72	0,2642	1,26	0,3962	1,80	0,4641	2,68	0,4963
0,20	0,0793	0,74	0,2703	1,28	0,3997	1,82	0,4656	2,72	0,4967
0,22	0,0871	0,76	0,2764	1,30	0,4032	1,84	0,4671	2,76	0,4971
0,24	0,0948	0,78	0,2823	1,32	0,4066	1,86	0,4686	2,80	0,4974
0,26	0,1026	0,80	0,2881	1,34	0,4099	1,88	0,4699	2,84	0,4977
0,28	0,1103	0,82	0,2939	1,36	0,4131	1,90	0,4713	2,88	0,4980
0,30	0,1179	0,84	0,2995	1,38	0,4162	1,92	0,4726	2,92	0,4982
0,32	0,1255	0,86	0,3051	1,40	0,4192	1,94	0,4738	2,96	0,4985
0,34	0,1331	0,88	0,3106	1,42	0,4222	1,96	0,4750	3,00	0,49865
0,36	0,1406	0,90	0,3159	1,44	0,4251	1,98	0,4761	3,20	0,49931
0,38	0,1480	0,92	0,3212	1,46	0,4279	2,00	0,4772	3,40	0,49966
0,40	0,1554	0,94	0,3264	1,48	0,4306	2,04	0,4793	3,60	0,499841
0,42	0,1628	0,96	0,3315	1,50	0,4332	2,08	0,4812	3,80	0,499928
0,44	0,1700	0,98	0,3365	1,52	0,4357	2,12	0,4830	4,00	0,499968
0,46	0,1772	1,00	0,3413	1,54	0,4382	2,16	0,4846	4,50	0,499997
0,48	0,1844	1,02	0,3461	1,56	0,4406	2,20	0,4861	5,00	0,499997
0,50	0,1915	1,04	0,3508	1,58	0,4429	2,24	0,4875		
0,52	0,1985	1,06	0,3554	1,60	0,4452	2,28	0,4887		

**Приложение Б**  
**Таблица значений гамма-функции**

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt$$

$k$	$\Gamma(k)$	$k$	$\Gamma(k)$	$k$	$\Gamma(k)$	$k$	$\Gamma(k)$
1,00	1,0000	1,25	0,9064	1,50	0,8862	1,75	0,9191
1,01	0,9943	1,26	9044	1,51	8866	1,76	9214
1,02	9888	1,27	9025	1,52	8870	1,77	9238
1,03	9835	1,28	9007	1,53	8876	1,78	9262
1,04	9784	1,29	8990	1,54	8882	1,79	9288
1,05	9735	1,30	8975	1,55	8889	1,80	9314
1,06	9687	1,31	8960	1,56	8896	1,81	9341
1,07	9642	1,32	8946	1,57	8905	1,82	9368
1,08	9597	1,33	8934	1,58	8914	1,83	9397
1,09	9555	1,34	8922	1,59	8924	1,84	9426
1,10	9514	1,35	8912	1,60	8935	1,85	9456
1,11	9474	1,36	8902	1,61	8947	1,86	9187
1,12	9436	1,37	8893	1,62	8959	1,87	9518
1,13	9399	1,38	8885	1,63	8972	1,88	9551
1,14	9364	1,39	8879	1,64	8986	1,89	9584
1,15	9330	1,40	8873	1,65	9001	1,90	9618
1,16	9298	1,41	8868	1,66	9017	1,91	9652
1,17	9267	1,42	8864	1,67	9033	1,92	9688
1,18	9237	1,43	8860	1,68	9050	1,93	9724
1,19	9209	1,44	8858	1,69	9068	1,94	9761
1,20	9182	1,45	8857	1,70	9086	1,95	9799
1,21	9156	1,46	8856	1,71	9106	1,96	9837
1,22	9131	1,47	8856	1,72	9126	1,97	9877
1,23	9108	1,48	8857	1,73	9147	1,98	9917
1,24	9030	1,49	8859	1,74	9168	1,99	9959
						2,00	1,0000

**Приложение В**  
**Интенсивность отказов изделий механического и электротехнического оборудования**

Наименование изделия	Характеристика режима функционирования	Интенсивность отказов, 1/ч
Двигатели внутреннего сгорания	при работе	0,3.10 <sup>-3</sup>
Клапаны гидравлические	при открытии	0,1-0,4.10 <sup>-3</sup>
Клапаны вакуумные	при переключениях	1,2.10 <sup>-3</sup>
Клапаны обратные	при работе	0,3.10 <sup>-4</sup>
Электропневмоклапаны		0,3.10 <sup>-3</sup>
Насосы гидравлические		4,4.10 <sup>-3</sup>
Цилиндры гидравлические		0,9.10 <sup>-4</sup>
Муфты соединительные		0,3.10 <sup>-3</sup>
Прокладки резиновые		0,6.10 <sup>-2</sup>
Шайбы и жиклеры расходные		0,1.10 <sup>-6</sup>
Датчики уровня поплавковые		0,2.10 <sup>-2</sup>
Датчики давления		0,5.10 <sup>-3</sup>
Манометры		при измерениях
Расходомеры гидравлические	0,5.10 <sup>-2</sup>	
Тахометры	0,4.10 <sup>-2</sup>	
Выключатели: с ручным приводом	при переключениях	
гидравлические		0,4.10 <sup>-3</sup>
моментные		0,4.10 <sup>-3</sup>
концевые		0,4.10 <sup>-3</sup>
Электродвигатели	при пуске	1,2.10 <sup>-3</sup>
Муфты электромагнитные	под нагрузкой	1,2.10 <sup>-3</sup>
Реле электромагнитные	при включении	0,4.10 <sup>-3</sup>
Батареи аккумуляторные	под нагрузкой	0,3.10 <sup>-5</sup>
Трансформаторы		0,1.10 <sup>-5</sup>
Анализаторы газа: кислорода	при измерениях	6,5.10 <sup>-3</sup>
водорода		3,5.10 <sup>-3</sup>
паров воды		1,2.10 <sup>-3</sup>
углекислого газа		0,8.10 <sup>-3</sup>
Датчики уровня емкостные	при измерениях	2,5.10 <sup>-5</sup>
Транзисторы		0,3.10 <sup>-6</sup>
Конденсаторы		0,3.10 <sup>-7</sup>
Резисторы		4,6.10 <sup>-5</sup>
Микросхемы		0,1.10 <sup>-8</sup>

Белов П.Г. Теоретические основы обеспечения безопасности эксплуатации вооружения и военной техники. – М., МО СССР, 1988. – 110 с.

Федоров Алексей Владимирович  
Велеулов Закий Алексеевич  
Фирюлин Данил Романович  
Кинжагулов Игорь Юрьевич

## **Надежность изделий и систем**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А