

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Омский государственный технический университет»

---

**А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев**

# **НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Учебное пособие в двух частях

## **Часть 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ**

*Рекомендовано Сибирским региональным учебно-методическим центром  
высшего профессионального образования для межвузовского использования  
в качестве учебного пособия для студентов специальностей  
направления подготовки «Безопасность жизнедеятельности»*

Омск  
Издательство ОмГТУ  
2011

УДК 62-192.002.5(073)  
ББК 30.14я73  
К70

Рецензенты:

*А. И. Володин*, д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе ОмГУПС;  
*В. В. Титенко*, канд. техн. наук, доц., проректор по учебной работе СибАДИ

**Корчагин, А. Б.**

К70 Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие : в 2 ч.  
/ А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011.

ISBN 978-5-8149-1066-0

Ч. 1 : Основы теории. – 228 с. : ил.

ISBN 978-5-8149-1067-7

Учебное пособие посвящено вопросам анализа и последующего расчета надежности технических систем и сопутствующего риска. Состоит из двух частей. В первой части изложены основы теории надежности. Рассмотрены основные понятия, описаны математические модели объектов и методы их анализа. Приведены данные об отказах элементов и систем, о методах поддержания работоспособности. Дана последовательность построения графов.

Предназначено для студентов специальностей направления подготовки «Безопасность жизнедеятельности»; может быть полезным при профессиональной переподготовке специалистов.

УДК 62-192.002.5(073)  
ББК 30.14я73

ISBN 978-5-8149-1067-7 (ч. 1)  
ISBN 978-5-8149-1066-0

© ГОУ ВПО «Омский государственный  
технический университет», 2011

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1. ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ .....	9
1.1. История развития научно-технического направления «надежность».....	9
1.2. Основные понятия и определения теории надежности.....	10
1.3. Классификация и характеристики отказов.....	13
2. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ.....	17
2.1. Основные понятия и определения .....	17
2.2. Теорема сложения вероятностей.....	20
2.3. Теоремы умножения вероятностей .....	21
2.4. Теорема о повторении опытов .....	21
2.5. Формула полной вероятности.....	22
2.6. Формула Байеса (формула вероятностей гипотез).....	22
2.7. Законы распределения случайной величины.....	23
2.8. Числовые характеристики случайных величин .....	26
3. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОБЪЕКТА .....	30
3.1. Предварительные сведения.....	30
3.2. Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов .....	32
3.3. Показатели безотказности восстанавливаемых объектов .....	35
3.4. Показатели долговечности объектов .....	41
3.5. Показатели сохраняемости объектов.....	44
3.6. Экономические показатели надежности объектов.....	45
3.7. Комплексные показатели надёжности объектов.....	45
4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ.....	48
4.1. Статистическая обработка результатов испытаний.....	48
4.2. Надежность объектов в период нормальной эксплуатации .....	49
4.3. Надежность объектов при постепенных отказах .....	53
4.3.1. Нормальный закон распределения наработки до отказа .....	54
4.3.2. Усеченное нормальное распределение .....	58
4.3.3. Логарифмически нормальное распределение.....	60
4.3.4. Гамма-распределение .....	62
4.3.5. Распределение Вейбулла – Гнеденко.....	63

4.4. Совместное действие внезапных и постепенных отказов.....	66
4.5. Надёжность восстанавливаемых объектов. Постановка задачи. Общая расчетная модель.....	67
4.5.1. Показатели надежности восстанавливаемых объектов .....	70
4.5.2. Связь логической схемы надежности с графом состояний.....	76
4.6. Пример расчета безотказности с использованием модели «прочность – нагрузка».....	77
<b>5. СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>82</b>
5.1. Надёжность систем. Структурная схема надежности системы .....	82
5.2. Расчёт надёжности систем с последовательным соединением элементов .....	87
5.3. Расчет надежности систем с параллельным соединением элементов.....	89
5.4. Анализ сложных систем.....	91
5.5. Расчет структурной надежности систем .....	94
5.5.1. Системы типа « <i>m</i> из <i>n</i> » .....	94
5.5.2. Мостиковые схемы .....	98
5.5.3. Комбинированные системы.....	105
<b>6. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ...</b>	<b>108</b>
6.1. Резервирование .....	108
6.2. Кратность резервирования и основные расчетные формулы.....	112
6.3. Замечания к расчетам надежности систем с резервированием.....	123
<b>7. ОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЗАЩИТА ОТ НИХ.....</b>	<b>131</b>
7.1. Анализ риска.....	131
7.2. Выбор методов анализа риска.....	132
7.3. Методы проведения анализа риска.....	134
7.3.1. Анализ опасностей и связанных с ними проблем.....	134
7.3.2. Анализ видов, последствий и критичности отказов.....	134
7.3.3. Анализ диаграммы всех возможных последствий несрабатывания или аварии системы («дерево неисправностей»).....	136
7.3.4. Анализ диаграммы возможных последствий события («дерево событий»).....	136
7.3.5. Предварительный анализ опасностей.....	139

7.3.6. Оценка влияния на надежность человеческого фактора.....	140
7.3.7. «Дерево решений» .....	140
7.3.8. Таблица решений .....	142
<b>8. ПОСТРОЕНИЕ «ДЕРЕВА НЕИСПРАВНОСТЕЙ» .....</b>	<b>143</b>
8.1. «Дерево неисправностей» как модель структуры отказов системы .....	143
8.2. Достоинства «дерева неисправностей».....	144
8.3. Недостатки «дерева неисправностей» .....	145
8.4. Структура «дерева неисправностей» .....	145
8.5. Логические символы.....	146
8.6. Правила применения логических символов.....	150
8.7. Символы событий.....	154
8.8. Последовательность построения «дерева неисправностей».....	157
<b>9. РАСЧЕТ РИСКА.....</b>	<b>170</b>
9.1. Количественная оценка риска.....	170
9.2. Определение величины риска сокращения продолжительности жизни от воздействия радиоактивного загрязнения .....	171
9.3. Определение величины риска заболевания профессиональной вибрационной болезнью .....	172
9.4. Метод «дерева рисков».....	175
9.5. Метод рейтинговой оценки риска.....	178
9.6. Метод полуколичественной оценки риска.....	182
<b>10. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙ И КАТАСТРОФ.....</b>	<b>183</b>
10.1. Номенклатура аварий и катастроф.....	183
10.2. Статистика аварий и катастроф .....	185
10.3. Причины аварийности на производстве.....	187
10.4. Человеческий фактор как источник риска.....	190
10.5. Факторы производственной среды и их влияние на надежность системы «человек – машина».....	194
10.6. Применение распределения Пуассона для оценки риска аварий.....	195
10.7. Примеры оценки риска аварий.....	202
10.8. Примеры определения вероятности безотказной работы технической системы .....	202

11. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ.....	209
11.1. Организация работ по обеспечению надёжности .....	209
11.2. Сертификация систем обеспечения надёжности.....	212
11.3. Подготовленность к аварийным ситуациям и реагирование на них....	215
11.3.1. Цель мероприятий по обеспечению аварийной подготовленности.....	215
11.3.2. Задачи организации по обеспечению аварийной подготовленности.....	216
11.3.3. Действия по обеспечению аварийной подготовленности.....	217
11.3.4. Анализ произошедших аварий.....	217
11.3.5. Предупреждение, локализация, ликвидация и учет аварийных ситуаций и аварий.....	218
11.3.6. Техническое обеспечение аварийной подготовленности и реагирования .....	220
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	222
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	223

## ВВЕДЕНИЕ

Стратегическим ресурсом общества, занимающим ключевое место в экономике, образовании и культуре, становится информация. В частности, информация о техническом состоянии оборудования и работоспособности персонала имеет первостепенное значение для решения задач обеспечения надежности, безопасности и экономической эффективности сложных систем.

Появляются все более сложные конструктивно и чрезвычайно опасные для обслуживающего персонала и окружающей среды уникальные системы (летательные аппараты, ядерные энергетические установки, химические комплексы и др.), таким образом, проблема надежности технических систем становится все более актуальной.

Несмотря на разнообразие литературы по теории надежности, испытывается недостаток в учебных пособиях, которые могут быть рекомендованы студентам, обучающимся по специальностям направления «Безопасность жизнедеятельности». В качестве примера можно упомянуть как библиографическую редкость изданный в 1988 г. учебник по теории надежности Э. Дж. Хенли и Х. Кумамото в переводе В. С. Сыромятникова и Г. С. Деминой, а также изданный в 1972 г. сборник задач по теории надежности под редакцией А. М. Половко и И. М. Маликова.

Предлагаемое учебное пособие призвано восполнить недостаток в учебной литературе. Замысел авторов состоял в том, чтобы теоретический материал дополнялся примерами решения задач и примерами анализа и количественной оценки надежности и риска технических систем.

Целью данной работы является оказание помощи студентам в усвоении, систематизации и применении знаний в области надежности и техногенных рисков; издание может стать теоретической базой при выполнении контрольных и курсовых заданий, подготовке выпускных квалификационных работ, а также при решении технических и организационных задач по технической и промышленной безопасности.

Учебное пособие состоит из двух частей. Структура первой части подчинена логике и последовательности изучения общепрофессиональной дисциплины федерального компонента ГОС ВПО «Надежность технических систем и техногенный риск».

Первая глава знакомит читателя с краткой историей развития теории надежности, с основными понятиями, классификацией и характеристиками отказов.

Во второй главе изложены основы теории вероятностей, являющейся неотъемлемой частью теории надежности, особое внимание уделено определе-

нию вероятности с целью избавления от формулировок типа «вероятность чего-либо есть вероятность...».

Третья глава посвящена показателям безотказности невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов, в том числе экономическим и комплексным.

В четвертой главе представлены математические модели теории надежности, даны принципы определения надежности объектов в разные периоды их эксплуатации.

Пятая глава раскрывает содержание основных принципов структурно-логического анализа технических систем. Большое внимание уделено методам расчета и анализа надежности различных типов сложных систем.

В шестой главе рассмотрены методы повышения надежности технических систем, а также классификация методов резервирования.

Седьмая глава посвящена опасностям технических систем и способам защиты от них. Приведены критерии выбора методов анализа риска, опасностей, видов отказов, последствий отказов. Дана оценка влияния человеческого фактора на надежность систем.

В восьмой главе подробно описано построение «дерева неисправностей», сочетающего в себе количественные и качественные приемы анализа надежности технической системы.

В девятой главе даны характеристики методов анализа и расчета риска в неразрывной связи с оценкой надежности.

Десятая глава раскрывает содержание задач прогнозирования аварий и катастроф. Приведены сведения о формировании номенклатуры и организации ведения статистики аварий и катастроф.

Одиннадцатая глава описывает методы организации и сертификации работ по обеспечению надежности, показывает цели и задачи аварийного реагирования и аварийной подготовленности.

Ряд глав учебного пособия дополнен контрольными вопросами и задачами.

В части второй пособия изложены примеры и практические рекомендации по решению задач, связанных с анализом надежности и риска различных технических систем; приведены разработанные авторами контрольные задания с вариантами исходных данных. В приложениях ко второй части содержится информация об интенсивностях отказов элементов.

Авторами учебного пособия являются: А. Б. Корчагин, канд. техн. наук, В. С. Сердюк, д-р техн. наук, А. И. Бокарев, канд. техн. наук. В подготовке пособия к публикации принимала участие К. В. Марченко.

Авторы считают своим долгом выразить признательность за ценные замечания и рекомендации рецензентам – доктору технических наук, профессору Омского государственного университета путей сообщения А. И. Володину и

кандидату технических наук, доценту Сибирской автомобильно-дорожной академии В. В. Титенко.

# **1. ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ**

## **1.1. История развития научно-технического направления «надёжность»**

Теория надёжности появилась в начале XX в. как результат научно-технического прогресса. Объектами исследования являются закономерности возникновения отказов объектов, технологические приёмы восстановления их работоспособности. Рассматриваются происходящие в объектах процессы, разрабатываются методы расчёта надёжности технических объектов, методы прогнозирования отказов. Выбираются способы увеличения надёжности при проектировании и эксплуатации объектов, а также способы сохранения надёжности при эксплуатации. Определяются методы сбора, учёта и анализа статистических данных, характеризующих надёжность.

Математической основой теории надёжности являются теория вероятностей и математическая статистика, математическая логика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, теория информации, теория планирования эксперимента и другие математические дисциплины.

В истории развития теории надёжности выделяют три периода. С первой четверти до начала 60-х годов XX в. (период становления науки) надёжность оценивалась по числу зафиксированных отказов. По статистике отказов входящих в систему элементов определялись значения интенсивности отказов, затем выполнялись расчёты надёжности. Такой подход развивался в связи с решением проблемы надёжности в радиоэлектронике и автоматике. В числе авторов работ, связанных с теорией надёжности, Н. Ф. Хоциалов (механические системы), А. М. Берг, Н. Г. Бруевич (радиоэлектроника и автоматика), Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев (математические вопросы теории надёжности) и др., а также известные зарубежные авторы – Г. Майер, Дж. Нейман, К. Шеннон, А. Пирс.

В 60-е годы XX в. (второй период) стали учитывать влияние функциональных связей между элементами системы, влияние на отказы эксплуатационных факторов – температуры, среды, вибраций, электрической нагрузки и пр. В результате накоплен богатый статистический материал, обобщённый теоретически.

Во второй половине 70-х годов (третий период) усилия учёных направлены на решение задач прогнозирования надёжности объектов и оценки надёжности сложных систем. Характерной особенностью периода стала глубина про-

никновения в физико-химические и статистические закономерности появления отказов в простых и сложных системах.

В современной теории надёжности выделяют направления: совершенствование конструктивных и технологических методов надёжности; обеспечение эксплуатационной надёжности.

Нормативной основой для развития указанных направлений являются международные и государственные стандарты, стандартные методики и программы обеспечения надёжности.

Открытие в 1985 г. Робертом Керлом, Гарольдом Крото и Ричардом Смолли фуллеренов явилось началом эпохи нанотехнологий. Новое аллотропное состояние углерода с его каркасной структурой, состоящей из пяти- и шестиугольных ячеек, с числом атомов от 36 до 540, расширило границы знания. В 1991 г. С. Иидзума сообщил миру о существовании нанотрубок, в которых ячейки из образованных атомами углерода шестиугольников соединены в трубки диаметром до одного нанометра и длиной до нескольких десятков микрометров. Развитие области знаний о наномире неизбежно приведет к изменению понятия «надёжность». Это предположение основано на результатах оценки перспектив создания революционных технологий – программируемых матриц механосинтеза, которые делают возможным массовое производство с атомарной точностью любой материальной структуры [67].

## **1.2. Основные понятия и определения теории надёжности**

Основные понятия теории надёжности установлены стандартом [7].

*Надёжность* – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Надёжность является сложной характеристикой, сочетающей свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

Одно из самых важных свойств надёжности элементов и систем – *безотказность*:

- означает свойство объекта находиться в работоспособном состоянии в течение некоторого времени;
- относится к режиму эксплуатации объекта;
- подразумевает исключение учёта перерывов в работе объекта (плановых и неплановых);

– показывает техническое состояние объекта: исправность, неисправность, работоспособность, неработоспособность, дефект, повреждение и отказ; каждое из этих состояний описывается совокупностью значений параметров объекта и качественных признаков; номенклатура этих параметров и признаков, а также пределы их допустимых изменений устанавливаются нормативной документацией на объект.

Согласно [7], *безотказность* – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

*Долговечность* – свойство объектов сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

*Ремонтопригодность* – свойство приспособленности объекта: а) к предупреждению и обнаружению причин отказов, повреждений; б) к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Свойством ремонтпригодности обусловлено деление объектов на восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Это деление условно и зависит от рассматриваемой ситуации.

*Сохраняемость* – свойство объекта сохранять состояние безотказности, ремонтпригодности и долговечности:

- а) в течение (после) срока хранения;
- б) при транспортировании.

Предметом анализа надёжности являются состояния отказа и работоспособности объекта.

*Объект* – техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Понятием *изделие* обозначается единица продукции, выпускаемой данным предприятием.

В зависимости от условий выполняемой задачи один и тот же технический объект может называться системой или элементом.

*Система* – объект, в котором различаются взаимозависимые части, объединенные одной задачей. Система представляет собой совокупность элементов, связанных определенными отношениями и взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить выполнение системой некоторой достаточно сложной функции.

*Элемент* – ограниченный объект, являющийся частью другого объекта.

Связь понятий «система» и «элемент» относительна, так как любой объект может быть системой в одних условиях и элементом – в других. Например, производящий энергию объект является системой, но в объединении подобных объектов он становится элементом.

*Исправность* – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической документации и (или) конструкторской (проектной) документации.

*Неисправность* – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической документации и (или) конструкторской (проектной) документации.

*Работоспособность* – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации и (или) конструкторской (проектной) документации.

*Неработоспособность* – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической документации и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособность и неработоспособность в общем случае могут быть полными или частичными. Полностью работоспособный объект обеспечивает в определённых условиях максимальную эффективность его применения.

*Предельное состояние* – такое состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния недопустимо или нецелесообразно.

Критерии *предельного состояния* – признаки, устанавливаемые в нормативно-технической и конструкторской документации.

*Дефект* (по ГОСТ 15467–79) – событие, при котором нарушается исправное состояние объекта, но сохраняется его работоспособность.

*Повреждение* – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния при сохранении работоспособного состояния.

*Отказ* – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

В результате повреждений или отказов происходят переходы объектов из одних состояний в другие. При этом границы между состояниями условны и определяются значениями параметров, а также условиями работы объектов. Объекты, работоспособные в одних условиях, могут оказаться неработоспособными в других, оставаясь исправными.

К числу важнейших относится понятие «*наработка*». Его содержание и параметры будут рассмотрены в главе 3.

### 1.3. Классификация и характеристики отказов

При возникновении отказов в технической системе происходит следующее: изменяется характер работы, появляются внешние признаки отказов и зависимость от отказов других систем, уменьшается возможность дальнейшего полноценного использования системы, появляется необходимость оценить возможность устранения отказов, характер устранения основных параметров отказов, определить причины возникновения отказов и др.

*Содержание происходящих изменений:*

1. Характер работы после возникновения отказов:

– *параметрический* отказ происходит вследствие превышения пределов допустимого изменения рабочего параметра. Продолжение эксплуатации машины, имеющей такой отказ, может привести к выпуску некачественной продукции или к снижению эффективности работы машины (например, к потере точности металлорежущего станка). Более того, в сложных машинах и системах параметрические отказы элементов могут привести к отказу функционирования;

– отказ *функционирования (функциональный)* наступает из-за прекращения выполнения объектом его основных функций, дальнейшая эксплуатация возможна только после ремонта.

2. Внешние признаки отказов:

– *явный (очевидный)* отказ – непосредственно воспринимается органами чувств или средствами контроля;

– *неявный (скрытый)* отказ – тот, для обнаружения которого требуется выполнение специальных операций контроля.

3. Зависимость от отказов других объектов:

– *независимым* называется отказ, не обусловленный отказом другого объекта;

– *зависимый* отказ обусловлен отказом другого объекта.

4. Возможность дальнейшего использования объектов:

– *полный* отказ – прекращение объектом выполнения всех функций;

– *частичный* отказ – выполнение некоторых функций.

5. Возможность устранения отказов:

– *устранимый* отказ – такой, причины которого известны и могут быть устранены, что исключает их возникновение вновь для изделия данного вида;

– *неустранимый* отказ – такой, причины которого неизвестны или не могут быть устранены для изделия данного вида.

6. Характер устранения отказов:

– *устойчивый* отказ – требующий проведения специальной работы;

– *самоустраняющийся* отказ – кратковременное нарушение работоспособности;

– *сбой* – отказ, не нарушающий работоспособности объекта, приводящий к кратковременной потере или искажению полезной информации в системе;

– *перемежающийся* отказ – многократно возникающий самоустраняющийся отказ объекта, имеющий один и тот же характер.

7. Характер изменения основных параметров отказов:

– *внезапный* отказ – появляющийся при скачкообразном изменении значений одного или нескольких параметров объекта;

– *постепенный* отказ – связан с медленным изменением значений параметров объекта;

– *систематический* отказ – многократно повторяющийся однородный по определенным признакам отказ, появляющийся вследствие недостатков конструкции, процесса изготовления и т. д.

8. Причины возникновения отказов:

– *конструкционный* отказ – возникающий из-за недостатков конструкции;

– *производственный (технологический)* отказ – следствие ошибок, нарушений и несовершенства технологии;

– *эксплуатационный* отказ – следствие нарушений правил эксплуатации.

9. Значимость отказов:

– *критический* отказ – такой, при котором возникает угроза человеку или окружающей среде;

– *существенный* отказ – такой, при котором ухудшение эксплуатационных характеристик или полная непригодность объекта к эксплуатации не приводят к опасности для человека;

– *несущественный* отказ – такой, который имеет незначительные последствия, вызывающие недовольство.

10. Время возникновения отказов:

– *прирабочный* отказ – появляется в начальный период эксплуатации;

– отказ *при нормальной* эксплуатации;

– отказ *вследствие износа* – появляется в *заключительный период* эксплуатации.

Вариант классификации отказов представлен на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Классификация отказов

## Контрольные вопросы

1. Назовите основные этапы становления надёжности как науки.
2. В чем заключается понятие надёжности как свойства объекта?
3. Дайте определения основных состояний и событий, которыми характеризуется надёжность.
4. В чем общность и отличия состояний «исправность» и «работоспособность» объекта?
5. При каких условиях наступает предельное состояние объекта?
6. Какими могут быть объекты по пригодности к восстановлению работоспособного состояния?
7. Какими могут быть отказы по типу и природе происхождения?
8. По каким признакам классифицируют отказы?
9. Дайте определения свойств (составляющих) надёжности.
10. Перечислите и поясните показатели долговечности.

## 2. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

### 2.1. Основные понятия и определения

*Испытанием* (опытом) называется одно из сколь угодно большого числа раз *воспроизводимого* определённого перечня (состава) условий.

*Событие* – совокупность явлений, происходящих в результате *испытания*.

Если событие происходит неизбежно в результате каждого испытания, оно называется *достоверным*.

Если событие не может произойти, оно называется *невозможным*.

Множество возможных при данном испытании *и связанных с ним* событий называется *полем событий*, а события этого поля – *случайными событиями*.

*Случайное событие* – всякий факт (исход), который может произойти или не произойти.

*Выборкой* называется небольшая часть некоторого множества объектов, отобранная наугад. При этом отобранные объекты правильно отражают качества и свойства элементов множества, что достигается в результате тщательного предварительного перемешивания (диспергирования) свойств. Отбор каждого элемента выборки является *испытанием* и завершается соответствующим *событием*.

*Выборка с возвращением* – при последовательном выборе шаров из урны после каждого выбора взятый шар возвращается в урну.

*Выборка без возвращения* – из урны выбирается некоторое количество шаров без возвращения.

Пусть  $n$  – число элементов выборки от 1 до  $n$ . Осуществление выборки представляет собой *поле событий*

$$A_1, A_2, \dots, A_n, \quad (2.1)$$

где  $A_n$  – отбор  $n$ -го элемента, а события поля равновозможны.

События поля могут быть *элементарными* и *сложными*. Сложному событию  $A_n\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ , где  $n_1 < n_2 < \dots < n_k$  – номера элементарных событий, составляющих сложное, соответствует появление событий с номерами  $n_1$ , или  $n_2$ , или  $n_k$ . Здесь каждому событию  $A_n$  соответствует некоторое количество (или подмножество) элементарных событий.

Говорят, что событие  $A$  влечёт за собой событие  $B$  (из  $A$  следует  $B$ ), если при наступлении  $A$  неизбежно наступление  $B$ .

Если из  $A$  следует  $B$  и одновременно из  $B$  следует  $A$ , то события  $A$  и  $B$  эквивалентны, или  $A = B$ .

Каждое событие поля представляет собой подмножество некоторых событий из множества  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$ . Например, событие  $B$ , состоящее в появлении номеров 2, 5, 7, принято обозначать  $B\{2, 5, 7\}$ . Его записывают как логическую сумму

$$B = A_2 + A_5 + A_7, \quad (2.2)$$

где «+» равнозначен союзу «или».

В данном случае можно событие  $B$  представить как сумму двух событий

$$B = \{2, 5\} + \{7\}$$

или

$$B = (A_2 + A_5) + A_7. \quad (2.3)$$

Событие  $B$  является также суммой *несовместных* событий, так как события  $\{2, 5\}$  и  $\{7\}$  не могут произойти в одном испытании. *Совместными* являются события  $\{1, 2, 3, 4\}$  и  $\{4, 5, 6, 7\}$ , они наступают вместе в тех испытаниях, в которых появляется номер 4. Сумма  $\{1, 2, 3\} + \{1, 2\}$  тождественна событию  $\{1, 2, 3\}$ .

Сумма любых двух событий поля есть событие того же поля.

Полю всегда принадлежит достоверное событие  $S\{1, 2, \dots, n\}$ , заключающееся в том, что выбирается один из номеров от 1 до  $n$ . События « $-n$ », ..., « $-1$ », 0,  $n+1$  *невозможны* и обозначаются  $\bar{A}$  («не  $A$ »).

События  $A$  и  $\bar{A}$  – *взаимно дополнительные* или *противоположны*, если они несовместны и составляют в сумме достоверное событие, т. е. достоверно то, что наступит  $A$  или  $\bar{A}$ .

Под *произведением* событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$  понимается одновременное наступление их всех, т. е. когда  $A_1$ , и  $A_2$ , и ... и  $A_n$  наступают вместе.

Произведением двух событий  $C\{1, 2, 3, 4\}$  и  $D\{2, 4, 6, 8\}$  является событие  $E = CD = \{2, 4\}$ .

*Случайной* называется величина, которая может принять какое-либо неизвестное заранее возможное значение, зависящее от случайных факторов, не поддающихся учету (обозначается  $\bar{A}$ ).

Случайные величины могут быть прерывными (дискретными) и непрерывными.

Прерывными (дискретными) называются величины, которые принимают отделённые друг от друга значения.

Непрерывными называются величины, возможные значения которых заполняют непрерывно некоторый конечный или бесконечный промежуток (ресурс).

**Относительная частота.** Пусть проводится серия из  $N$  испытаний в одинаковых условиях. Если интересующее нас событие, например  $A$ , произошло  $k_N(A)$  раз, то отношение

$$\frac{k_N(A)}{N} = W_N(A) \quad (2.4)$$

называется *относительной частотой* появления события  $A$  в данной серии испытаний. Очевидным является то, что

$$0 \leq W_N \leq 1, \quad (2.5)$$

$W_N = 0$  для невозможного события,  $W_N = 1$  для достоверного события.

**Вероятность.** Каждому из событий можно поставить в соответствие определенное число, называемое его *вероятностью*  $P = P(\langle A \rangle)$  или  $Q = P(\langle \text{не } A \rangle)$  и являющееся мерой возможного совершения этого события.

Вероятность есть численная мера, характеристика возможности появления события в диапазоне значений  $0 \dots 1$ .

$$0 \leq P(A) \leq 1. \quad (2.6)$$

Вероятность достоверного события равна единице

$$P(A) = 1. \quad (2.7)$$

Вероятность противоположного события дополняет вероятность данного события до единицы

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1, \quad (2.8)$$

где  $A$  и  $\bar{A}$  – противоположные события.

Вероятность невозможного события равна нулю

$$P(\bar{A}) = 0. \quad (2.9)$$

Сумма вероятностей несовместных событий, составляющих полную группу, равна единице

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = 1, \quad (2.10)$$

где  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – несовместные события, составляющие достоверное событие (полную группу событий).

Классическое определение вероятности: вероятность события  $A$  есть отношение числа  $m$  благоприятствующих этому событию исходов к общему числу  $n$  всех возможных элементарных несовместных и равновероятных исходов испытания.

$$P(A) = \frac{m}{n}. \quad (2.11)$$

В большой серии испытаний относительная частота  $W_N(A)$  приближается к вероятности  $P(A)$ .

## 2.2. Теорема сложения вероятностей

Вероятность появления какого-либо из нескольких несовместных событий равна сумме вероятностей каждого из этих событий:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_k) = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_k}{n} = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_k). \quad (2.12)$$

Следствие 1: сумма вероятностей всех возможных событий, составляющих данное событие, равна единице.

Следствие 2: сумма вероятностей двух противоположных событий равна единице.

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1. \quad (2.13)$$

*Условная вероятность* события  $A$  при наступлении события  $B$  – вероятность события  $A$ , вычисленная в предположении, что событие  $B$  произошло:

$$P(A/B) = P(AB)/P(B). \quad (2.14)$$

### 2.3. Теоремы умножения вероятностей

Теорема умножения вероятностей зависимых событий:

$$P(AB) = P(B) \cdot P(A/B). \quad (2.15)$$

Теорема умножения вероятностей независимых событий:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B). \quad (2.16)$$

На основании теорем сложения и умножения вероятностей составляется общее правило сложения вероятностей: вероятность суммы двух событий (совместных или несовместных) равна сумме вероятностей этих событий без вероятности совместного их наступления:

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (2.17)$$

Для несовместных событий  $P(AB) = 0$  и (2.17) приводится к (2.12).

### 2.4. Теорема о повторении опытов

Следствием правил сложения и умножения вероятностей является теорема о повторении опытов (схема Бернулли): опыты считаются независимыми, если вероятность того или иного исхода каждого из них не зависит от того, какие исходы имели другие опыты.

Пусть в некотором опыте вероятность события  $A$  равна  $P(A) = p$ , а вероятность того, что оно не произойдет,  $P(\bar{A}) = q$ , причём

$$P(A) + P(\bar{A}) = p + q = 1. \quad (2.18)$$

Если проводится  $n$  независимых опытов, в каждом из которых событие  $A$  появляется с вероятностью  $p$ , то вероятность того, что в данной серии опытов событие  $A$  произойдет  $m$  раз, а событие  $\bar{A}$  произойдет  $n-m$  раз, равна

$$P_n(m) = \begin{cases} \text{Событие } A \text{ произошло } m \text{ раз} \\ \text{Событие } \bar{A} \text{ произошло } n-m \text{ раз} \end{cases} = C_n^m p^m q^{n-m}, \quad (2.19)$$

где  $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$  – биномиальный коэффициент. (2.20)

Например, вероятность отсутствия ошибки чтения 32-разрядного слова в формате ЭВМ, представляющего комбинацию 0 и 1, при вероятности ошибки чтения двоичного числа  $p = 10^{-3}$  составляет по (2.8) при  $m = 0$ ,  $C_{32}^0 = 1$ :

$$P_{32}(0) = 1 \cdot (10^{-3})^0 \cdot (0,999)^{32} \approx 0,969$$

При больших  $m$  вычисление биномиальных коэффициентов  $C_n^m$  и возведение в большие степени  $p$  и  $q$  связано со значительными трудностями, поэтому целесообразно применять упрощенные способы расчётов. Приближение, называемое *теоремой Муавра – Лапласа*, используется, если  $npq \gg 1$ , а  $|m - np| < (npq)^{0,5}$ , в таком случае выражение (2.19) записывается:

$$P_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi npq}} e^{-\frac{(m-np)^2}{2npq}} \quad (2.21)$$

## 2.5. Формула полной вероятности

Если по результатам опыта можно сделать  $n$  исключаящих друг друга предположений (гипотез)  $H_1, H_2, \dots, H_n$ , представляющих полную группу несовместных событий, то вероятность события  $A$ , которое может появиться только с одной из этих гипотез, определяется:

$$P(A) = P(H_i) \cdot P(A/H_i), \quad (2.22)$$

где  $P(H_i)$  – вероятность гипотезы  $H_i$ ;

$P(A/H_i)$  – условная вероятность события  $A$  при гипотезе  $H_i$ .

Поскольку событие  $A$  может появиться с одной из гипотез  $H_1, H_2, \dots, H_i$ , то

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P(A/H_i) \quad (2.23)$$

## 2.6. Формула Байеса (формула вероятностей гипотез)

Если до опыта вероятности гипотез  $H_1, H_2, \dots, H_n$  были равны  $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$ , а в результате опыта произошло событие  $A$ , то новые (условные) вероятности гипотез вычисляются:

$$P(A|H_i) = \frac{P(H_i)P(A/H_i)}{\sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(A/H_i)} = \frac{P(H_i) \cdot P(A/H_i)}{P(A)}. \quad (2.24)$$

Доопытные (первоначальные) вероятности гипотез  $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$  называются *априорными*, а послеопытные –  $P(H_1/A), P(H_2/A), \dots, P(H_n/A)$  – *апостериорными*.

## 2.7. Законы распределения случайной величины

Законом распределения вероятности случайной величины называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Для получения закона распределения используют три способа:

- табличный (табл. 2.1)
  - графический (рис. 2.1)
  - аналитический – для непрерывных величин.
- } – для дискретных величин;

Таблица 2.1

### Табличный закон распределения

$X$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_n$
$P(X)$	$P(x_1)$	$P(x_2)$	$P(x_3)$	...	$P(x_n)$

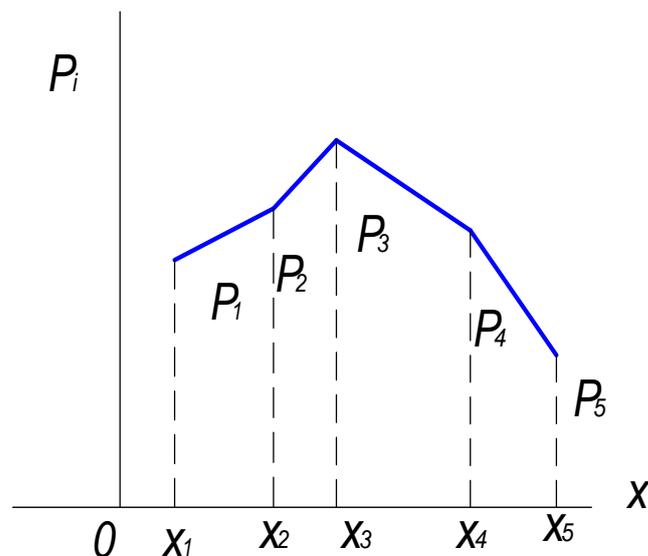


Рис. 2.1. Многоугольник распределения

Для непрерывных величин табличный способ не применяется. Непрерывные случайные величины задаются функцией распределения (рис. 2.2):

$$F(x) = P(x_1, \infty).$$

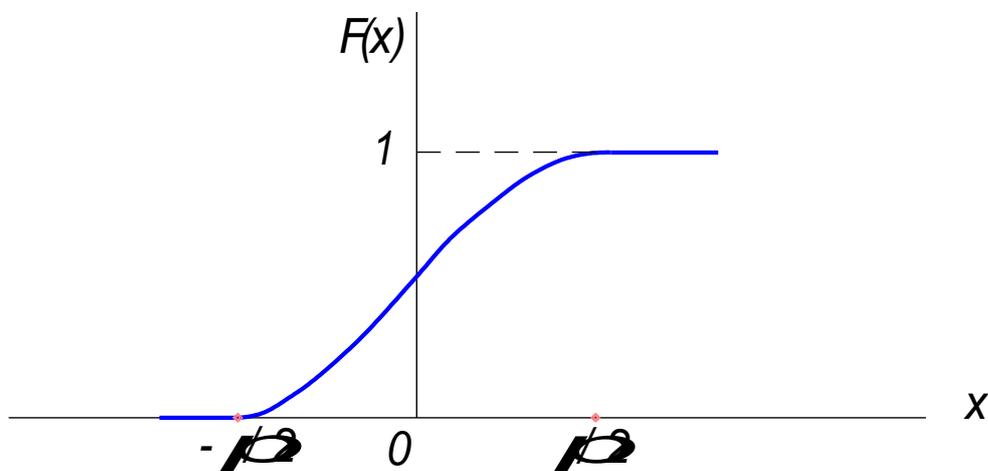


Рис. 2.2. Функция распределения непрерывной случайной величины

Функция распределения имеет ряд свойств:

1) она является неубывающей функцией ее аргумента, т. е. при  $x_2 > x_1$

$$F(x_2) \geq F(x_1);$$

2) на минус бесконечности функция распределения равна нулю

$$F(-\infty) = 0;$$

3) на плюс бесконечности функция распределения равна единице

$$F(+\infty) = 1.$$

Плотность распределения («плотность вероятности») – первая производная от функции распределения. Другие названия: «дифференциальная функция распределения», «дифференциальный закон распределения».

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2.25)$$

Плотность распределения изображается кривой распределения и показывает, как по оси абсцисс распределяются массы, т. е. кривая проходит через концы абсцисс значений «линейной плотности» (рис. 2.3).

Свойства плотности распределения:

1) плотность распределения – функция неотрицательная:

$$f(x) \geq 0,$$

2) интеграл в бесконечных пределах от плотности распределения равен единице:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

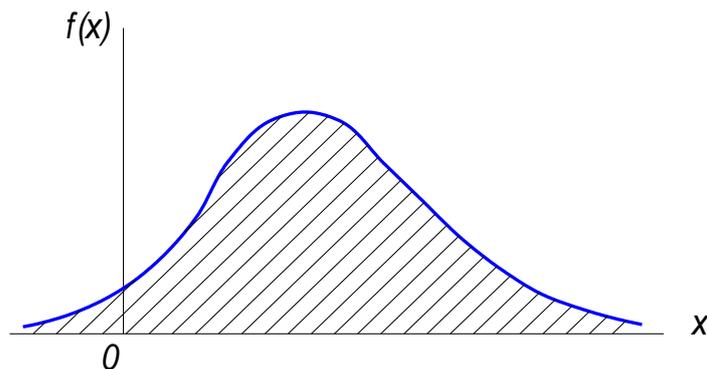


Рис. 2.3. Плотность распределения

Согласно свойству 2, функция распределения в интервале от 0 до  $x_1$  (рис. 2.4) определяется как интеграл плотности распределения

$$F(x) = \int_0^{x_1} f(x) dx = F(x_1) - F(0). \quad (2.26)$$

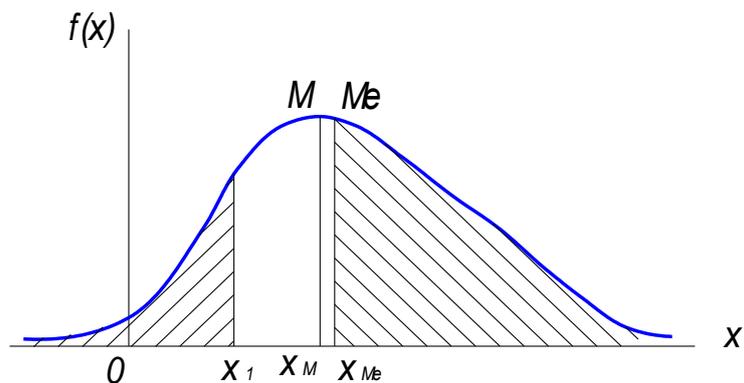


Рис. 2.4. Определение функции распределения

В ряде случаев бывает достаточно указать числовые характеристики.

## 2.8. Числовые характеристики случайных величин

1. *Математическое ожидание* – характеристика центра группирования случайных величин:

– для дискретных случайных величин

$$M(x) = \sum_{i=1}^n X_i P_i(x_i) ; \quad (2.27)$$

– для непрерывных случайных величин

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx . \quad (2.28)$$

2. *Модой* непрерывной случайной величины называется то её значение, в котором плотность вероятности наибольшая (т.  $M$  на рис. 2.4),  $M$  является точкой перегиба кривой. Модой дискретной случайной величины называется ее наиболее вероятное значение.

3. *Медианой* случайной величины  $X$  называется такое её значение, для которого ограниченная кривой распределения площадь делится пополам (т.  $Me$  на рис. 2.4). Площади справа и слева от медианы равны. Можно также определить медиану случайной величины  $X$  как такое ее значение  $Me$ , для которого  $P(X < Me) = P(X > Me)$ . В случае симметричного модального распределения медиана совпадает с математическим ожиданием и модой.

4. Значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности, называется *квантилью*. Квантиль при вероятности, равной 0,5, называется *медианой*.

5. *Дисперсия* есть сумма произведений квадратов разностей случайных величин и математических ожиданий:

– для дискретных случайных величин

$$D(x) = \sum_{i=1}^n (X_i - M(x))^2 \times P(x_i) ; \quad (2.29)$$

– для непрерывных случайных величин:

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (X - M(x))^2 f(x)dx . \quad (2.30)$$

6. Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)} . \quad (2.31)$$

7. Коэффициент вариации:

$$v(x) = \frac{\sigma(x)}{M(x)}, \quad (2.32)$$

$v(x) < 0,1$  – малое значение коэффициента;

$v(x) = 0,1 \dots 0,33$  – среднее значение коэффициента;

$v(x) > 0,33$  – большое значение коэффициента.

Свойства математического ожидания:

$$M(ax) = aM(x), \quad a = \text{const};$$

$$M(a + x) = a + M(x);$$

$$M(x \pm y) = M(x) \pm M(y);$$

$$M(xy) = M(x) \cdot M(y);$$

$$M(x^2) = (M(x))^2 + D(x).$$

Свойства дисперсии:

$$D(ax) = a^2D(x), \quad a = \text{const};$$

$$D(a + x) = D(x);$$

$$D(x \pm y) = D(x) \pm D(y);$$

$$D(x^2) = M(x^4) - [(M(x))^2 + \delta(x)^2].$$

**Пример 2.1.** Закон распределения случайной величины задан в виде таблицы:

$x$	1	2	5
$P(x)$	0,3	0,5	0,2

Определить числовые характеристики случайных величин.

**Решение:**

$$M(x) = 1 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 = 2,3$$

$$D(x) = (1 - 2,3)^2 \cdot 0,3 + (2 - 2,3)^2 \cdot 0,5 + (5 - 2,3)^2 \cdot 0,2 \approx 2$$

$$\sigma(x) = \sqrt{2} = 1,4$$

$$v(x) = \frac{\sigma(x)}{M(x)} = 0,6$$

**Пример 2.2.** Функция распределения имеет вид:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq 0 \\ 2x, & \text{при } 0 < x \leq 1 \\ 0, & \text{при } x > 1 \end{cases}$$

Оценить количественно, что вероятность примет значение из диапазона (0,5; 1). Какова вероятность попадания случайной величины в диапазон (0,5; 1) при условии, что событие не появится?

**Решение:**

$$F(x) = \int_{0,5}^1 f(x) dx = \int_{0,5}^1 2x dx = \frac{2x^2}{2} \Big|_{0,5}^1 = 1 - 0,25 = 0,75$$

$$Q(x) = 1 - 0,75 = 0,25$$

### Контрольные вопросы и задачи

1. Почему надёжность необходимо рассматривать в вероятностном аспекте?
2. Как можно подсчитать вероятность безотказной работы через число отказавших объектов и общее число объектов?
3. Какими способами задаются случайные величины?
4. Перечислите и поясните основные теоремы вероятности.
5. Назовите следствия основных теорем теории вероятностей.
6. Закон распределения случайной величины задан в виде таблицы:

$x$	-2	1	3	2
$P(x)$	0,2	0,1	0,4	0,3

Известно, что  $M(x) = 0$ .

Найти  $D(x)$ ,  $\sigma(x)$ ,  $\nu(x)$ ,  $M(x^2)$ .

7. Функция распределения имеет вид:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq 0; \\ e^{-x}, & \text{при } 0 \leq x \leq 1/2; \\ x^3, & \text{при } 1/2 < x \leq 1; \\ 0, & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

Найти вероятность того, что вероятность примет значение из диапазона

$$\left(\frac{1}{3}; \frac{2}{3}\right).$$

8. Прибор работает в двух режимах: «1» и «2». Режим «1» наблюдается в 60 % случаев, режим «2» – в 40 % случаев за время работы  $T$ . В режиме «1» прибор отказывает с вероятностью, равной 0,3, а в режиме «2» – с вероятностью 0,5. Определить вероятность отказа прибора за время  $T$ . Ответ: 0,38.

9. Прибор (рис. 2.5) состоит из трех блоков, которые независимо друг от друга могут отказать. Отказ каждого из блоков приводит к отказу всего прибора. Вероятность того, что за время  $T$  работы прибора откажет первый блок, равна 0,15, второй – 0,25, третий – 0,1. Найти вероятность того, что время  $T$  прибор проработает безотказно.

Ответ: 0,57375.

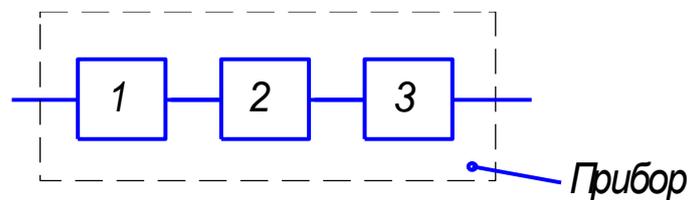


Рис. 2.5. Схема прибора

10. Прибор (рис. 2.6) состоит из двух блоков, дублирующих друг друга. Вероятность того, что время  $T$  каждый из блоков проработает безотказно, равна 0,9. Отказ прибора произойдет при отказе обоих блоков. Найти вероятность того, что время  $T$  прибор проработает безотказно.

Ответ: 0,99.

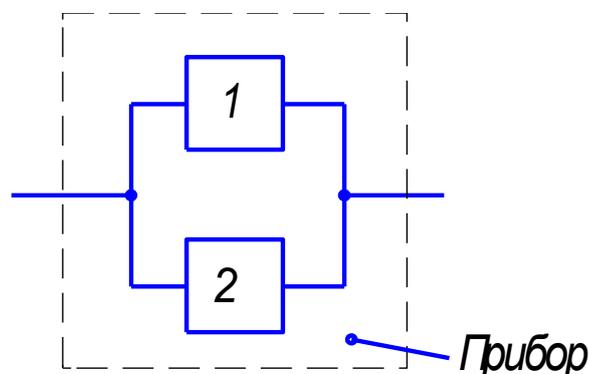


Рис. 2.6. Схема прибора

### 3. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОБЪЕКТА

#### 3.1. Предварительные сведения

Безотказность и другие свойства надёжности проявляются через случайные величины: наработку до отказа (наработку между отказами) и количество отказов за заданное время. Поэтому количественными характеристиками здесь выступают вероятностные переменные.

*Наработка* – продолжительность (объём) работы объекта. Измеряется в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружений, километры пробега и т. п.). Объект может работать непрерывно (с учётом перерывов на ремонт) или с перерывами, не зависящими от технического состояния (в этом случае различают непрерывную и суммарную наработки).

Появление отказов не предопределено заранее, т. е. случайно, поэтому теория надёжности основана на математическом аппарате теории вероятностей и математической статистики.

Для оценки надёжности проводятся эксплуатационные испытания значительного числа  $N$  элементов в течение времени  $t$ . Пусть к концу испытаний остается  $N_p$  работоспособных элементов и  $n$  отказавших.

Тогда относительное количество отказов:

$$Q(t) = \frac{n}{N}. \quad (3.1)$$

Вероятность безотказной работы оценивается относительным количеством работоспособных элементов:

$$P(t) = \frac{N_p}{N} = 1 - \frac{n}{N}. \quad (3.2)$$

Вероятность безотказной работы (ВБР) означает, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Так как безотказная работа и отказ – взаимно противоположные события, то сумма их вероятностей равна единице:

$$\begin{aligned} P(t) + Q(t) &= 1, \\ Q(t) = 1 - P(t) &= 1 - \int_t^{\infty} f(t) dt = \int_0^t f(t) dt = F(t). \end{aligned}$$

$F(t)$  есть интегральная функция распределения случайной наработки  $t$ .

Так как события, заключающиеся в том, что наступил или не наступил отказ к моменту наработки  $t$ , являются противоположными, то нетрудно убедиться, что  $P(t)$  является убывающей, а  $Q(t)$  – возрастающей функцией наработки (рис. 3.1).

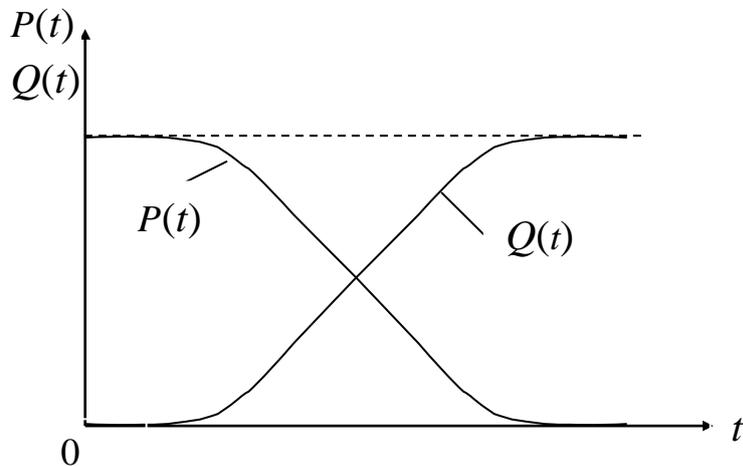


Рис. 3.1. Изображения функций  $P(t)$  и  $Q(t)$

Действительно: а) в момент начала испытаний ( $t=0$ ) число работоспособных объектов равно общему их числу  $N(t) = N(0) = N$ , а число отказавших –  $n(t) = n(0) = 0$ ,

поэтому  $P(t) = P(0) = 1$ , а  $Q(t) = Q(0) = 0$ ;

б) при наработке  $t$ , возрастающей до бесконечности ( $t \rightarrow \infty$ ), все объекты, поставленные на испытания, откажут, т. е.

$N(\infty) = 0$ , а  $n(\infty) = N$ , поэтому  $P(t) = P(\infty) = 0$ , а  $Q(t) = Q(\infty) = 1$ .

Вероятность безотказной работы есть *количественная мера* того, что случайная величина наработки до отказа  $T$  окажется не меньше некоторой заданной наработки  $t$ , если  $t \geq 0$ :

$$P(t) = P\{T \geq t\}. \quad (3.3)$$

Очевидно, что  $Q(t)$  является функцией распределения случайной величины  $T$  и представляет собой вероятность того, что наработка до отказа окажется меньше некоторой заданной наработки  $t$ :

$$Q(t) = P\{T < t\}. \quad (3.4)$$

**Пример 3.1.** Найти  $P(t)$  в интервале наработки  $[t, t + \Delta t]$  при условии, что объект безотказно проработал до начала  $t$  интервала.

**Решение:**

Вероятность определяется посредством использования теоремы умножения вероятностей и выделения следующих событий:

$A = \{\text{безотказная работа объекта до момента } t\};$

$B = \{\text{безотказная работа объекта в интервале } \Delta t\};$

$C = A \cdot B = \{\text{безотказная работа объекта до момента } t + \Delta t\}.$

Очевидно, что  $P(C) = P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B/A)$ , поскольку события  $A$  и  $B$  будут зависимыми.

Условная вероятность  $P(B/A)$  представляет  $P(t, t + \Delta t)$  в интервале  $[t, t + \Delta t]$ , поэтому

$$P(B / A) = P(t, t + \Delta t) = P(C) / P(A) = P(t + \Delta t) / P(t). \quad (3.5)$$

$Q(t)$  в интервале наработки  $[t, t + \Delta t]$ , с учётом (3.5), равна:

$$Q(t, t + \Delta t) = 1 - P(t, t + \Delta t) = [P(t) - P(t + \Delta t)] / P(t). \quad (3.6)$$

Все изделия являются либо *невосстанавливаемыми*, либо *восстанавливаемыми*.

### **3.2. Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов**

*Невосстанавливаемыми* называются такие объекты, для которых восстановление работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации [7].

Если происходит отказ такого изделия, то выполняемая операция будет сорвана, и ее необходимо начинать вновь в том случае, если возможно устранение отказа.

К таким изделиям относятся как изделия однократного действия (ракеты, управляемые снаряды, искусственные спутники Земли, усилители системы подводной межконтинентальной связи и т. п.), так и изделия многократного действия (некоторые системы навигационного комплекса судового оборудования, системы ПВО, системы управления воздушным движением, системы управления химическими, металлургическими и другими ответственными производственными процессами и т. д.).

Для невосстанавливаемых объектов применяется понятие *наработка до отказа* (он же является и последним отказом).

В расчетах пользуются *средней наработкой до отказа*, определяемой в [7] как математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

Средняя наработка до отказа  $T_1$  вычисляется по формуле

$$T_1 = \int_c^{\infty} t f(t) dt = \int_{\infty}^{\infty} [1 - F(t)] dt = \int P(t) dt, \quad (3.7)$$

где  $F(t)$  – функция распределения наработки до отказа;

$P(t)$  – вероятность безотказной работы;

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

Статистически средняя наработка до отказа определяется по формуле

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j, \quad (3.8)$$

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

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

Для дифференцируемых функций распределения случайной величины определяется первая производная, называемая *плотностью распределения (законом распределения)* времени работы объекта до отказа:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d(1 - P(t))}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (3.9)$$

Другим важным показателем надежности является *интенсивность отказов*, которая сообщает, какая часть объектов выходит из строя в единицу времени относительно среднего числа исправно работающих объектов.

Интенсивность отказов как статистический параметр – отношение числа отказавших объектов в единицу времени к числу объектов, продолжающих безотказно работать в данный промежуток времени:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (3.10)$$

где  $\Delta n(\Delta t)$  – число отказавших объектов за промежуток времени от  $(t - \Delta t / 2)$  до  $(t + \Delta t / 2)$ ,

$$N(t) = \frac{N_{i-1} + N_i}{2}, \quad (3.11)$$

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

Интенсивность отказов как вероятностный параметр – условная плотность вероятности возникновения отказа изделия при условии, что до рассматриваемого момента времени  $t$  отказ не возник [7]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}, \quad (3.12)$$

где функции  $f(t)$  и  $\lambda(t)$  измеряются в часах в минус первой степени.

При интегрировании (3.12) получается:

$$P(t) = \exp \left[ -\int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (3.13)$$

Величина  $\lambda(t)dt$  есть вероятность того, что элемент, безотказно проработавший в интервале наработки  $[0, t]$ , откажет в интервале  $[t, t + dt]$ .

Выражение (3.12), называемое основным законом надежности, позволяет установить временное изменение вероятности безотказной работы при любом характере изменения интенсивности отказов во времени.

В частном случае постоянства интенсивности отказов  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$  выражение (3.12) преобразуется в известное в теории вероятностей экспоненциальное распределение

$$\begin{aligned} P(t) &= \exp(-\lambda t); \\ F(t) &= 1 - \exp(-\lambda t); \\ f(t) &= \lambda \exp(-\lambda t). \end{aligned}$$

Таким образом, для невосстанавливаемых объектов применяют показатели  $P(t)$ ,  $T_1$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ .

### 3.3. Показатели безотказности восстанавливаемых объектов

*Восстанавливаемыми* называются изделия, которые в процессе выполнения своих функций допускают ремонт. Если произойдет отказ такого изделия, то он вызовет прекращение функционирования изделия только на период устранения отказа. К таким изделиям относятся: телевизор, агрегат питания, станок, автомобиль, трактор и т. п.

Величина  $\lambda(t)dt$  есть вероятность того, что элемент, безотказно проработавший в интервале наработки  $[0, t]$ , откажет в интервале  $[t, t + dt]$ .

Для восстанавливаемых объектов применяется понятие *наработка на отказ* (*наработка между двумя соседними во времени отказами*). После каждого отказа производится восстановление работоспособного состояния.

Характеристикой безотказности случайной наработки  $T$  является математическое ожидание, которое называется *средней наработкой на отказ* (*между отказами*) [7].

$$T = \frac{t}{M\{r(t)\}}, \quad (3.14)$$

где  $t$  – суммарная наработка;  $r(t)$  – число отказов, наступивших в течение этой наработки;  $M\{r(t)\}$  – математическое ожидание этого числа. В общем случае средняя наработка на отказ оказывается функцией  $t$ .

Статистическая оценка средней наработки на отказ  $\hat{T}$  есть величина, рассчитываемая по формуле

$$\hat{T} = \frac{t}{r(t)}. \quad (3.15)$$

В отличие от формулы (3.9) здесь  $r(t)$  – число отказов, фактически происшедших за суммарную наработку  $t$ .

Статистическая вероятность отказов

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N}, \quad (3.16)$$

где  $n(\Delta t)$  – количество отказов;

$N$  – число взятых на испытания объектов.

Статистическая частота отказов

$$\hat{f}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t}, \quad (3.17)$$

где  $\Delta t$  – данный интервал времени.

Параметры работоспособности:

- вероятность безотказной работы  $P(t)$ ;
- средняя наработка на отказ  $T$ ;
- параметр потока отказов  $\mu(t)$ ;
- среднее время восстановления  $T_B$ .

Параметр потока отказов  $\mu(t)$  есть отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M \{r(t + \Delta t) - r(t)\}}{\Delta t}, \quad (3.18)$$

где  $M \{r(t + \Delta t) - r(t)\}$  – математическое ожидание;  $\Delta t$  – малый отрезок наработки;  $r(t)$  – число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки  $t$ ;  $r(t + \Delta t) - r(t)$  – число отказов на отрезке  $\Delta t$ .

При расчетах и обработке экспериментальных данных применяют *средний параметр потока отказов*

$$\bar{\mu}(t) = \frac{M \{r(t_2) - r(t_1)\}}{t_2 - t_1}, \quad (3.19)$$

здесь  $[t_1, t_2]$  – конечный отрезок времени, на котором определяется число отказов, причем  $t_1 \leq t \leq t_2$ . Для стационарного потока отказов параметры, определяемые по формулам, не зависят от  $t$ .

Статистическая оценка параметра потока отказов делается по формуле, которая аналогична формуле (3.19):

$$\hat{\mu}(t) = \frac{r_2(t) - r_1(t)}{t_2 - t_1}. \quad (3.20)$$

Параметр потока отказов представляет собой *плотность вероятности возникновения отказа* восстанавливаемого объекта. Отказы объектов возникают в случайные моменты времени, и в течение заданного периода эксплуатации наблюдается поток отказов.

Существует множество математических моделей потоков отказов. Наиболее часто при решении задач надежности электроустановок используют *простейший поток отказов* – пуассоновский поток. Простейший поток отказов удовлетворяет одновременно трем условиям: стационарности, ординарности, отсутствия последствия.

*Стационарность* случайного процесса (времени возникновения отказов) означает, что на любом промежутке времени  $\Delta t_i$  вероятность возникновения  $n$  отказов зависит только от  $n$  и величины промежутка  $\Delta t_i$ , но не зависит от сдвига  $\Delta t_i$  по оси времени. Следовательно, при  $\Delta t_i = \Delta t_{i+1} = \dots = \Delta t_{i+m}$  вероятность появления  $n$  отказов по всем интервалам составит

$$Q_n(\Delta t_i) = Q_n(\Delta t_{i+1}) = \dots = Q_n(\Delta t_{i+m}). \quad (3.21)$$

*Ординарность* случайного процесса означает, что отказы являются событиями случайными и независимыми. Ординарность потока означает невозможность появления в один и тот же момент времени более одного отказа, т. е.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} Q(\Delta t) = 0 \quad \text{при } n > 1. \quad (3.22)$$

*Отсутствие последствия* означает, что вероятность наступления  $n$  отказов в течение промежутка  $\Delta t_i$  не зависит от того, сколько было отказов и как они распределялись до этого промежутка. Следовательно, факт отказа любого элемента в системе не приведет к изменению характеристик (работоспособности) других элементов системы, если даже система и отказала из-за какого-то элемента.

Опыт эксплуатации сложных технических систем показывает, что отказы элементов происходят мгновенно, и если старение элементов отсутствует ( $\lambda = \text{const}$ ), то поток отказов в системе можно считать простейшим.

Случайные события, образующие простейший поток, распределены по закону Пуассона:

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad \text{при } n_i \geq 0, \quad (3.23)$$

где  $P_n(t)$  – вероятность возникновения в течение времени  $t$  ровно  $n$  событий (отказов);  $\lambda$  – параметр распределения, совпадающий с параметром потока событий.

Если в выражении (3.23) принять  $n = 0$ , то получится  $P(t) = e^{-\lambda t}$  – вероятность безотказной работы объекта за время  $t$  при интенсивности отказов  $\lambda = \text{const}$ . Нетрудно доказать, что если восстанавливаемый объект при отсутствии восстановления имеет характеристику  $\lambda = \text{const}$ , то, придавая объекту восстанавливаемость, следует написать  $\mu(t) = \text{const}$ ;  $\lambda = \mu$ .

Это свойство широко используется в расчётах надёжности ремонтируемых устройств. Например, важнейшие показатели надёжности оборудования электроустановок даются в предположении, что потоки отказов и восстановлений являются простейшими, когда

$$\lambda = \mu = \frac{1}{T} \text{ и, соответственно,} \\ T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\mu} . \quad (3.24)$$

Среднее время восстановления  $\bar{T}_B$ :

$$\bar{T}_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{Bi} , \quad (3.25)$$

где  $n$  – число отказов объекта;

$T_{Bi}$  – время, затраченное на отыскание и устранение одного отказа.

Функция распределения:

$$F_B(t) = 1 - e^{-\lambda_B t} , \quad (3.26)$$

где  $\lambda_B$  – интенсивность восстановления работоспособности объекта; характеризует среднее число восстановлений ремонтируемого объекта в единицу времени,

$$\frac{dF_B(t)}{dt} = f_B(t) = \lambda_B e^{-\lambda_B t} . \quad (3.27)$$

Интенсивность восстановления работоспособности объекта:

$$\lambda_B = \frac{f_B(t)}{1 - F_B(t)} = \frac{f_B(t)}{1 - F_B(t)} , \quad (3.28)$$

$$T_B = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} 1 - F(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_B t} dt = \frac{1}{\lambda_B}, \quad (3.29)$$

$$P(t) = \int_0^t t_B(t) dt, \quad (3.30)$$

$$\hat{P}_B = \frac{n(t)}{N}, \quad (3.31)$$

где  $n(t)$  – число восстановленных за время  $t$  объектов;

$N$  – общее число отказавших объектов.

Вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта:

$P_r(t)$  – количественная мера того, что объект в заданный момент времени будет работоспособен.

Событие  $A$ : объект работоспособен до момента времени  $t$  и работоспособен на участке времени  $\Delta t$ . Выражение для события  $A$ :

$$P(t, t + \Delta t) = P(t)P(\Delta t) = P(t)e^{-\lambda \Delta t}.$$

Событие  $B$ : объект вышел из строя к моменту времени  $t$ , но был восстановлен за период  $\Delta t$ . Выражение для события  $B$ :

$$P(t, t + \Delta t) = (1 - P(t))(1 - e^{-\lambda \Delta t}),$$

$$P(t, t + \Delta t) = P(t) e^{-\lambda \Delta t} + (1 - P(t))(1 - e^{-\lambda \Delta t}). \quad (3.32)$$

Согласно формулам (3.9)–(3.13)

$$e^{-\lambda \Delta t} = 1 - \lambda_B \Delta t$$

преобразуется к виду:

$$1 - e^{-\lambda \Delta t} = \lambda_B \Delta t,$$

$$P(t, t + \Delta t) = P(t)(1 - \lambda \Delta t) + (1 - P(t)),$$

$$\lambda_B \Delta t = 1,$$

$$1 = P(t) - P(t)\lambda \Delta t + \lambda_B \Delta t - P(t) \lambda_B \Delta t,$$

$$\frac{P(t, t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = -P(t) \cdot (\lambda + \lambda_B) + \lambda_B,$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t, t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = -P(t) \cdot (\lambda + \lambda_B) + \lambda_B,$$

$$\frac{dP(t)}{dt} + P(t) \cdot (\lambda + \lambda_B) - \lambda_B = 0.$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$P(t) = \frac{\lambda_B}{\lambda + \lambda_B} + \frac{\lambda}{\lambda + \lambda_B} e^{-(\lambda + \lambda_B)t} \quad (3.33)$$

Изображение функции  $P_r(t)$  восстанавливаемого изделия и функции  $P(t)$  невосстанавливаемого изделия представлено на рис. 3.2.

Надёжность восстанавливаемого  $P_r(t)$  изделия всегда выше надёжности невосстанавливаемого изделия  $P(t)$ .

**Пример 3.2.** В результате наблюдения за работой редуктора было зарегистрировано 8 отказов, наработки  $t_i$  составляют в сутках: 18, 9, 14, 27, 16, 8, 14, 22.

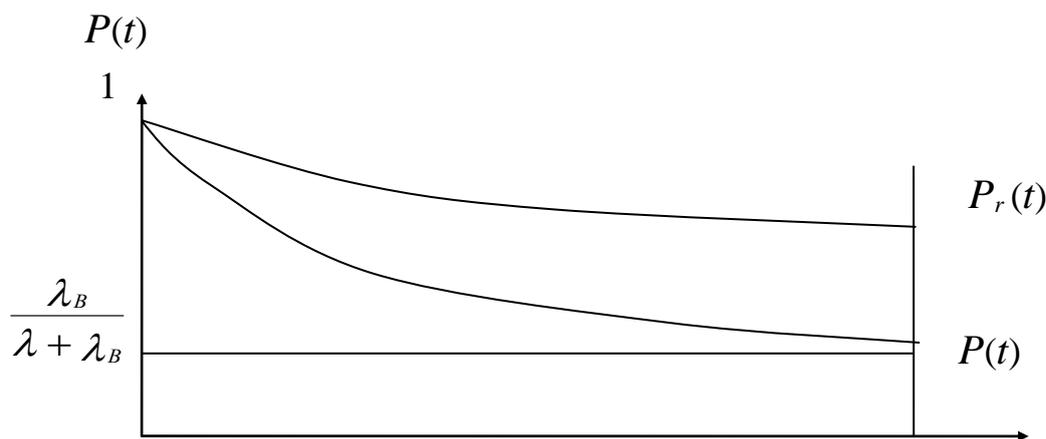


Рис. 3.2. Графики функции  $P_r(t)$  и  $P(t)$

Определить наработку на отказ  $\hat{T}$  и вероятность его безотказной работы в пределах наработки  $\Delta t = 20$  ч.

**Решение:**

$$\hat{T} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{18 + 9 + 14 + \dots + 22}{8} = 16 \text{ суток,}$$

$$P(t) = e^{-\lambda_B t},$$

$$\lambda_B(t) = \frac{\sum_{i=1}^N n_i(\Delta t)}{N \Delta t} = \frac{6}{8 \cdot 20} = 0,0375,$$

$$P(t) = e^{-0,0375 \cdot 20} = 0,472.$$

### 3.4. Показатели долговечности объектов

Для введенного в п. 1.2 понятия «долговечность» используются следующие показатели: срок службы  $T_{cl}$ , ресурс  $T_p$ , назначенный ресурс  $T_{н.р}$ , средний ресурс  $T_{p.cр}$ , гамма-процентный ресурс  $T_\gamma$ .

*Срок службы  $T_{cl}$*  – календарная продолжительность эксплуатации объекта от её начала до наступления предельного состояния.

*Ресурс  $T_p$*  – наработка объекта от начала эксплуатации до наступления предельного состояния (может быть расстояние и время).

Строго говоря, технический ресурс может быть регламентирован следующим образом: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т. п. Если регламентация отсутствует, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех видов ремонтов. Для невосстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

*Назначенный ресурс  $T_{н.р}$*  – суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от технического состояния (есть ряд объектов, которые снимаются с эксплуатации при выработке назначенного ресурса).

На рис. 3.3 приведена графическая интерпретация перечисленных показателей, при этом:

$t_0 = 0$  – начало эксплуатации;

$t_1, t_5$  – моменты отключения по технологическим причинам;

$t_2, t_4, t_6, t_8$  – моменты включения объекта;

$t_3, t_7$  – моменты вывода объекта в ремонт, соответственно, средний и капитальный;

$t_9$  – момент прекращения эксплуатации;

$t_{10}$  – момент отказа объекта.

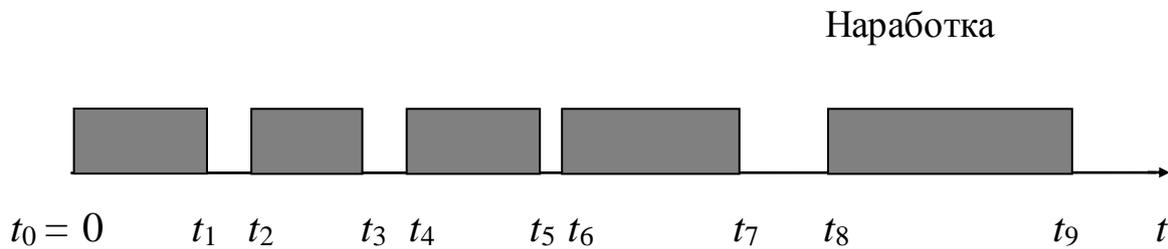


Рис. 3.3. Схема эксплуатации объекта

Технический ресурс (наработка до отказа):

$$T_P = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8). \quad (3.34)$$

Назначенный ресурс:

$$T_{н.р} = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8). \quad (3.35)$$

Срок службы объекта  $T_{сл} = t_{10}$ .

Для большинства объектов в качестве критерия долговечности чаще всего используется технический ресурс.

Средний ресурс  $T_{р.ср}$  (средний срок службы  $T_{сл.ср}$ ) – среднее значение ресурса (срока службы) совокупности объектов одного типа, размера и использования:

$$T_{р.ср}(T_{сл.ср}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_p(T_{сл})_i, \quad (3.36)$$

$$T_{р.ср}(T_{сл.ср}) = \int_{T_j}^{\infty} t f(t) dt. \quad (3.37)$$

Гамма-процентный ресурс  $T_\gamma$  – наработка, с течением которой изделие не достигает предела состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ :

$$P(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100} = \int_{T_\gamma}^{\infty} f_p(t) dt. \quad (3.38)$$

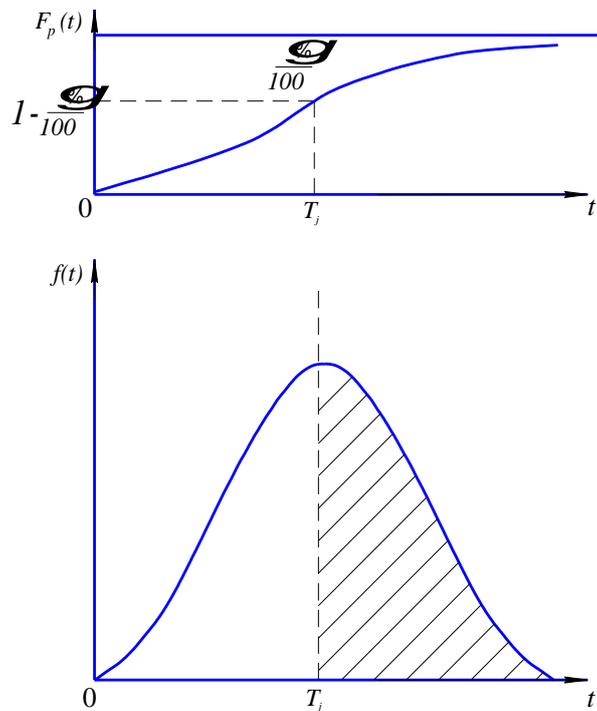


Рис. 3.4. Функции  $F(T_\gamma)$  и  $f_p(t)$

Гамма-процентный ресурс  $T_\gamma = 90\%$  означает, что данное изделие проработает до своего предельного состояния с вероятностью более  $90\%$  либо выйдет из строя с вероятностью  $10\%$ .

**Пример 3.3.** Для протяжного станка задан гамма-процентный ресурс  $T_\gamma = 99\%$ . Определить необходимый показатель интенсивности отказов, время эксплуатации (срок службы)  $T = 12\,000$  ч.

**Решение:**

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad \lambda = \frac{-\ln P(t)}{t}; \quad P(t) = 0,99; \quad \lambda = \frac{-\ln 0,99}{12000} = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

**Пример 3.4.** Нарботка до отказа  $t$  для 10 персональных компьютеров составила в часах: 21, 42, 68, 36, 18, 49, 16, 22, 74, 18. Вычислить надёжность персонального компьютера в течение 40 ч и определить интенсивность отказов в период между 20 и 50 ч работы и среднюю наработку до отказа.

**Решение:**

$$T_0 = \frac{\sum t_i}{n} = 36,4 \text{ ч,}$$

$$\lambda(\Delta t) = \frac{n(\Delta t)}{N \Delta t} = \frac{5}{8 \cdot 30} = 0,020 \text{ ч}^{-1}.$$

Считается, что компьютеры работают в течение периода нормальной эксплуатации, для которого выполняется условие

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt},$$

$$P(t) = \exp(-\lambda t);$$

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t);$$

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t).$$

При  $\lambda(t) = \text{const}$

$$M[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = T_0.$$

Значение  $T_0$  находят путём подстановки  $f(t)$  в последнее уравнение:

$$T_0 = \int_0^{\infty} \lambda t \cdot \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda} \text{ ч};$$

$$\lambda = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{36,4} = 0,0274 \text{ ч}^{-1};$$

$$P(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-0,0274 \cdot 40) = 0,334.$$

### 3.5. Показатели сохраняемости объектов

*Срок сохраняемости* – календарная продолжительность хранения (транспортирования) объекта, в течение которой и в дальнейшем сохраняются значения показателей безотказности и долговечности в установленных пределах.

Средний срок сохраняемости

$$T_{cp} = \int_{t_1}^{t_2} t f_c(t) dt \quad (3.39)$$

*Гамма-процентный срок сохраняемости* – календарная продолжительность хранения (транспортирования), в течение и после которой показатели безотказности и долговечности объекта не выйдут за установленные пределы с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

*Назначенный срок хранения* в заданных условиях – срок хранения, по истечении которого применение объекта по назначению не допускается, независимо от его технического состояния.

### 3.6. Экономические показатели надёжности объектов

Экономические показатели надёжности позволяют оценить затраты на использование техники, ремонтного оборудования, обслуживание и сделать вывод.

Коэффициент экономичности:

$$K_{э} = \frac{Q_u + Q_{э}}{T_{э}}, \quad (3.40)$$

где  $Q_u$  – цена изготовления объекта;

$Q_{э}$  – затраты на эксплуатацию (ремонт, обслуживание, потери от простоя);

$T_{э}$  – срок эксплуатации.

Цена надёжности:

$$Q_n = Q_{n.a} \left( \frac{T_0}{T} \right)^a, \quad (3.41)$$

где  $Q_{n.a}$  – цена надёжности аналога;

$T_0, T$  – наработка на отказ прототипа и проектируемого изделия;

$a$  – эмпирический показатель, характеризующий уровень прогрессивности производства с точки зрения возможности заданного повышения надёжности изделия,  $a = 0,5 \dots 1,5$ .

### 3.7. Комплексные показатели надёжности объектов

Коэффициент готовности  $K_G$  – вероятность работоспособного состояния восстанавливаемого объекта:

$$K_G = \frac{\mu}{\mu + \lambda_B} = \frac{\overline{T_{в.ср}}}{\frac{1}{T_{в.ср}} + \frac{1}{T_0}} = \frac{T_0}{T_0 + T_{в.ср}}, \quad (3.42)$$

где  $\lambda_B$  – интенсивность восстановления;

$\mu$  – параметр потока отказов.

Коэффициент оперативной готовности  $K_{OG}$  – предусматривает необходимость внезапного использования объекта, после чего требуется безотказное выполнение объектом основной функции в течение времени оперативной готовности  $T_{OG}$ :

$$K_{OG} = K_G \cdot P(t_p) = \frac{\lambda_B}{\mu + \lambda_B} e^{-\mu t_p} \quad (3.43)$$

Коэффициент технического использования  $K_{ТИ}$ :

$$K_{ТИ} = \frac{T_{сум}}{T_{сум} + T_{рем} + T_{обсл}}, \quad (3.44)$$

где  $T_{сум}$  – суммарное время пребывания объекта в работоспособном состоянии;

$T_{рем}$  – время нахождения объекта в ремонте;

$T_{обсл}$  – время нахождения объекта в обслуживании.

Коэффициент простоя  $K_{П}$  – вероятность нахождения объекта в неработоспособном состоянии:

$$K_{П} = 1 - K_G = 1 - \frac{\mu}{\mu + \lambda_B} = \frac{\lambda_B}{\mu + \lambda_B} = \frac{T_{в.ср}}{T_0 + T_{в.ср}} \quad (3.45)$$

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение вероятности безотказной работы объекта и пояснить ее смысл.
2. Укажите отличия вероятности безотказной работы объекта при наработке  $t$  от вероятности безотказной работы в интервале наработки  $[t, t + \Delta t]$ .
3. Дайте графическую интерпретацию понятий вероятности безотказной работы и вероятности отказов.
4. Дайте определение интенсивности отказов.
5. По результатам испытаний  $N = 50$  однотипных элементов определите показатели безотказности для заданных наработок  $t_i$ , если известно, что число отказавших элементов  $n(t_i)$  к моментам наработки составляет:

$$n(t_1) = 2, \quad t_1 = 200 \text{ ч,}$$

$$n(t_2) = 5, \quad t_2 = 300 \text{ ч,}$$

$$n(t_3) = 7, \quad t_3 = 400 \text{ ч},$$

$$n(t_4) = 10, \quad t_4 = 500 \text{ ч},$$

$$n(t_5) = 15, \quad t_5 = 600 \text{ ч}.$$

6. Какие показатели надежности восстанавливаемых объектов существуют?

7. Что такое поток отказов?

8. Как можно посчитать вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта?

9. Перечислите показатели долговечности.

10. Перечислите показатели сохраняемости.

11. Зачем нужно знать экономические показатели надёжности?

12. Перечислите экономические показатели надёжности.

13. Перечислите комплексные показатели надёжности.

## 4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ

### 4.1. Статистическая обработка результатов испытаний

Для решения задач по оценке надёжности и прогнозированию работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель, которая представлена аналитическими выражениями одного из показателей  $P(t)$ ,  $f(t)$  или  $\lambda(t)$ . Основным путём для получения модели состоит в проведении испытаний, вычислении статистических оценок и их аппроксимации аналитическими функциями.

Возникает необходимость выяснить, как изменяется безотказность объектов при их эксплуатации, что позволит классифицировать модели и определить возможности их применения.

Опыт эксплуатации показывает, что изменение интенсивности отказов  $\lambda(t)$  подавляющего большинства объектов описывается  $U$ -образной кривой (рис. 4.1).

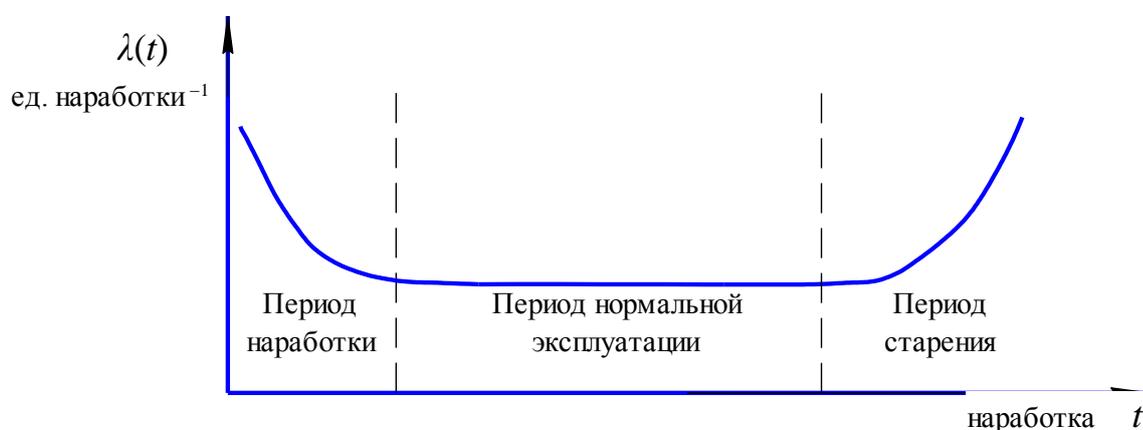


Рис. 4.1. Кривая изменения интенсивности отказов

Кривую можно условно разделить на три характерных участка: первый — период приработки, второй — период нормальной эксплуатации, третий — период старения объекта.

*Период приработки* объекта имеет повышенную интенсивность отказов, вызванную приработочными отказами, обусловленными дефектами производства, монтажа, наладки. Иногда с окончанием этого периода связывают гарантийное обслуживание объекта, когда устранение отказов производится изготовителем.

В период нормальной эксплуатации интенсивность отказов уменьшается и практически остается постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего, из-за несоблюдения условий эксплуатации, случайных изменений нагрузки, неблагоприятных внешних факторов и т. п. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации объекта.

Возрастание интенсивности отказов относится к периоду старения объекта и вызвано увеличением числа отказов от износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией.

Вид аналитической функции, описывающей изменение показателей надежности  $P(t)$ ,  $f(t)$  или  $\lambda(t)$ , определяет закон распределения случайной величины, который выбирается в зависимости от свойств объекта, условий его работы и характера отказов.

## 4.2. Надёжность объектов в период нормальной эксплуатации

Надёжность в этот период характеризуется внезапными отказами, так как постоянные отказы ещё не проявляются. Внезапные отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную и интенсивность, не зависящую от возраста изделия:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const}, \quad (4.1)$$

$$\lambda = 1/T,$$

где  $T$  – средняя наработка до отказа (обычно в часах),

$$T \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (4.2)$$

где  $t_i$  – наработка до отказа  $i$ -го изделия;  $N$  – общее число наблюдений.

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (4.3)$$

Она подчиняется экспоненциальному закону распределения времени безотказной работы изделия и одинакова в любых одинаковых промежутках времени в период нормальной эксплуатации.

Экспоненциальное распределение описывает:

1) наработку до отказа объектов, у которых в результате сдаточных испытаний (выходного контроля) отсутствует период приработки, а назначенный ресурс установлен до окончания периода нормальной эксплуатации. Примеры таких объектов: сложные технические системы с множеством компонентов, средства вычислительной техники, системы автоматического регулирования и т. п.;

2) схему возникновения внезапных, мгновенных повреждений устройств. В этом случае отказ не зависит от состояния самого устройства, а является следствием внешних условий его эксплуатации (ударных нагрузок, температурных условий и т. п.).

Внешняя нагрузка является случайной из-за неизбежных случайных колебаний внешних условий и неизбежных случайных отклонений взаимодействия элементов в системе. Нагрузка изменяется непрерывно и относительно плавно (рис. 4.2).

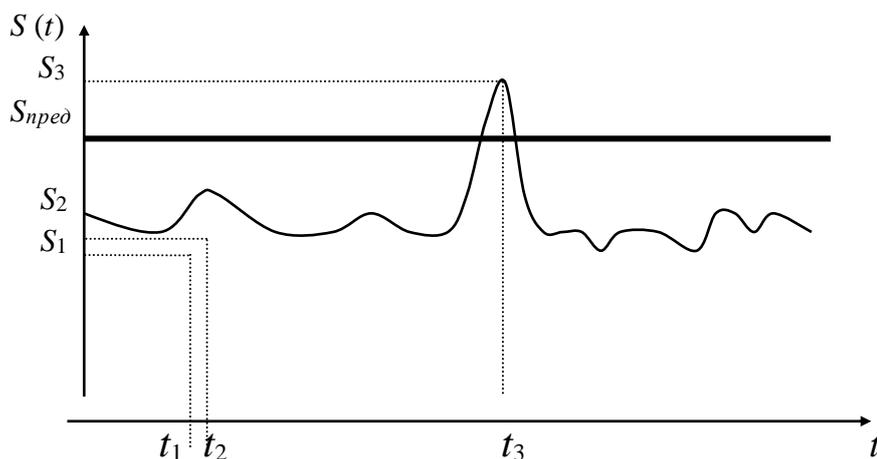


Рис. 4.2. Процесс изменения некоторой нагрузки

Это означает, что если взять два соседних момента времени  $t_1$  и  $t_2$ , то соответствующие им нагрузки  $S_1$  и  $S_2$  будут связаны друг с другом. Так, если  $S_1$  мала, то маловероятно, что  $S_2$  будет велика. Это утверждение тем более верно, чем меньше интервал  $S$  времени  $t_1 - t_2$ . В то же время, если взять участки времени, значительно удаленные друг от друга ( $t_2$  и  $t_3$ ), то величина  $S_3$  будет мало зависеть от величины  $S_2$ .

Описанное свойство нагрузки называется асимптотической независимостью нагрузки  $S_3$  от  $S_2$ , когда разность  $t_3 - t_2$  велика. Асимптотическая независимость отражает тот факт, что связь между  $S_3$  и  $S_2$  существует и уменьшается по мере роста разности  $t_3 - t_2$ .

Пиковые значения нагрузки при её плавном изменении возникают также случайно, в силу чего невозможно предсказать момент их появления. При этом отсутствие направленного изменения нагрузки называется ее стационарностью.

Любой элемент имеет ограниченную прочность. Поэтому имеется некоторая предельная нагрузка  $S_{пред}$ , которую система способна выдержать без отказа. Если некоторое текущее значение нагрузки  $S_i$  превзойдет  $S_{пред}$ , то в соответствующий этому событию момент времени  $t_i$  произойдет внезапный отказ. При этом уровень предельной нагрузки  $S_{пред}$  остается, как правило, постоянным в течение всего времени эксплуатации элемента.

Таким образом, внезапный отказ наступает не как следствие постепенного изменения внутреннего состояния элемента, а лишь как результат внешнего случайного воздействия, имеющего величину больше допустимого. В силу этого внезапный отказ наблюдается чаще всего в начальный момент времени эксплуатации устройства. Становится очевидным, что при внезапных отказах нет смысла прибегать к профилактическим мерам типа предварительной замены элементов или их периодического ремонта.

Единственный путь повышения надёжности при внезапных отказах – конструктивное улучшение элементов или уменьшение величин действующих нагрузок.

Экспоненциальное распределение широко применяется для оценки надёжности в период нормальной эксплуатации.

Плотность распределения времени безотказной работы находится по следующей формуле:

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (4.4)$$

Графики изменения показателей безотказной работы при экспоненциальном распределении приведены на рис. 4.3.

Числовые характеристики наработки до отказа:

– средняя наработка до отказа

$$T_1 = \int_0^{\infty} \lambda \cdot \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda}; \quad (4.5)$$

– дисперсия наработки до отказа

$$D = \int_0^{\infty} \lambda (t - T)^2 \cdot \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda^2} \quad (4.6)$$

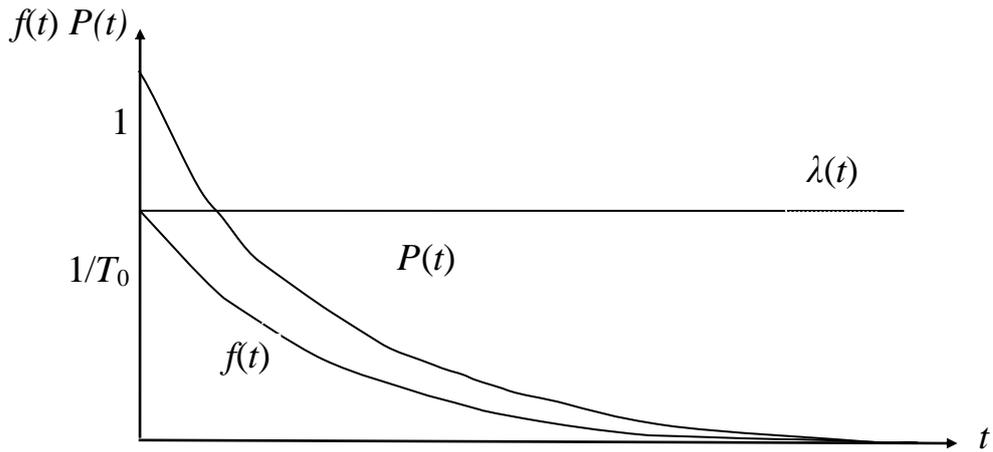


Рис. 4.3. Графики функций показателей безотказности при экспоненциальном распределении

При  $t \ll 1$ , т. е. при наработке  $t$  много меньшей, чем средняя наработка  $T$ , выражение (4.3) можно упростить, заменив  $e^{-\lambda t}$  двумя первыми членами разложения  $e^{-\lambda t}$  в степенной ряд.

Например, выражение для вероятности безотказной работы (ВБР) примет вид:

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t, \quad (4.7)$$

при этом погрешность вычисления  $P(t)$  не превышает  $(\lambda t)^2/2$ .

Для упрощенного вычисления вероятности безотказной работы можно использовать табл. 4.1.

Таблица 4.1

#### Упрощенное вычисление вероятности безотказной работы

$\lambda t \approx t/T$	1,0	0,1	0,01	0,001	0,0001
$P(t)$	0,368	0,9	0,99	0,999	0,9999

Так, при  $t/T = 1$  вероятность  $P(t) = 0,37$ , т. е. 63 % отказов возникает за время  $t < T$ , а 37 % – позднее. Из приведённых значений следует, что для обеспечения высокой вероятности безотказной работы, например 0,9 или 0,99, мож-

но использовать только малую долю среднего срока службы – 0,1 и 0,01 соответственно.

Если работа изделия происходит при разных режимах и разных интенсивностях отказов  $\lambda_i$ , то при этом верно условие:

$$P(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i\right), \quad (4.8)$$

где  $t_i$  – продолжительность работы в  $i$ -м режиме.

### Контрольные вопросы и задачи

1. Чем вызваны отказы в период нормальной эксплуатации?
2. Как описывается изменение плотности распределения отказов при экспоненциальном распределении наработки до отказа?
3. Известно, что серийно выпускаемая деталь имеет экспоненциальное распределение наработки до отказа с параметром  $\lambda = 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ . Деталь используется конструктором при разработке нового прибора. Назначенный ресурс прибора предполагается  $T_n = 10^4$  ч. Определить: а) среднюю полезную наработку детали к моменту  $T_n$ ; б) вероятность того, что деталь безотказно проработает в интервале наработки  $[0, T_n]$ .

Ответы: 1)  $9,5 \cdot 10^3$  ч, 2) 0,905.

### 4.3. Надёжность объектов при постепенных отказах

Постепенным отказам свойственны законы распределения времени безотказной работы, дающие сначала низкую плотность распределения, затем рост плотности и затем падение, связанное с уменьшением числа работоспособных объектов.

Многообразие причин и условий возникновения отказов в этот период приводит к необходимости применения нескольких законов распределений, которые устанавливаются путем аппроксимации результатов испытаний или наблюдений в эксплуатации.

Пример формирования распределения  $f(t)$  показан на графике изменения выходного параметра ряда механизмов, например потери точности металлорежущих станков одной марки в процессе эксплуатации (рис. 4.4).

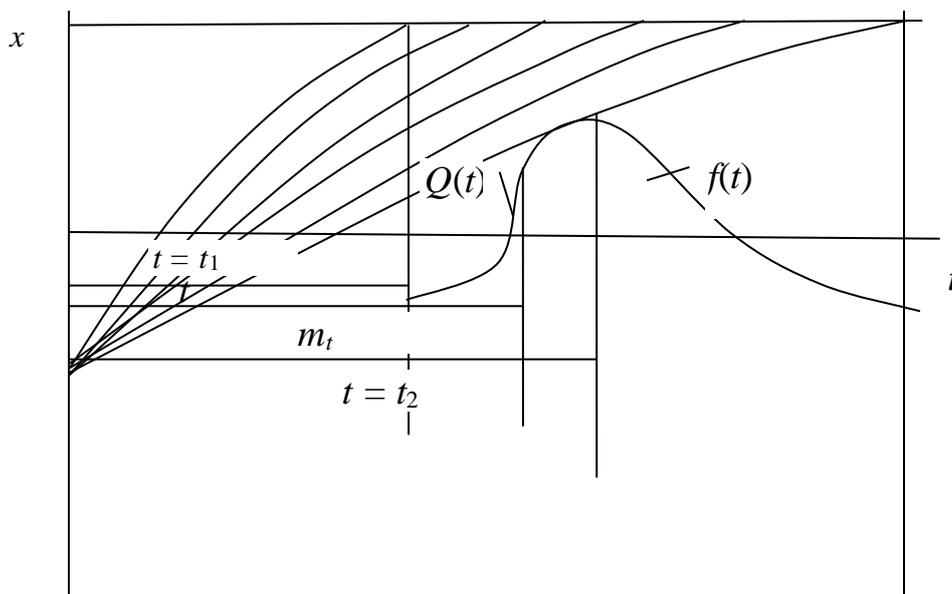


Рис. 4.4. Формирование закона распределения времени безотказной работы  $f(t)$

На этом рисунке показано:

$t_1$  – время работы, при котором появляются первые признаки отказов;

$t_2$  – время работы, при котором исчерпываются потенциальные возможности безотказной работы;

$m_t$  – математическое ожидание срока службы;

$t$  – время работы в интервале  $t_2 - t_1$ , определяющее вероятность безотказной работы  $P(t)$ ;

$Q(t) = 1 - P(t)$  – вероятность отказов во время работы в интервале  $t_2 - t_1$ .

#### 4.3.1. Нормальный закон распределения наработки до отказа

Нормальное распределение вероятности безотказной работы описывает схему длительного «естественного» старения (постепенные отказы). В этом случае отказы являются следствием накопления повреждений:

- при постоянной скорости износа;
- однородном начальном качестве объектов.

При таких начальных условиях большая часть отказов наблюдается в течение конечного периода работы объекта.

Нормальное распределение, или распределение Гаусса, является наиболее универсальным, удобным и широко применимым.

Распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие примерно равнозначные факторы.

Нормальному распределению подчиняются наработка до отказа многих восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, размеры, ошибки измерения деталей и т. д.

Плотность распределения отказов описывается формулой

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(t-T)^2}{2S^2}\right) \quad (4.9)$$

Распределение имеет два независимых параметра: математическое ожидание  $m_t$  и среднее квадратическое отклонение  $S$ .

$$m_t \approx \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}, \quad (4.10)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (4.11)$$

Графики изменения показателей безотказности при нормальном распределении приведены на рис. 4.5.

Выясним смысл параметров  $T$  и  $S$  нормального распределения. Из графика  $f(t)$  видно, что  $T$  является центром симметрии распределения, поскольку при изменении знака разности  $(t - T)$  выражение (4.9) не меняется. При  $t = T$  функция  $f(t)$  достигает своего максимума:

$$f(t)_{\max|t=T} = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \quad (4.12)$$

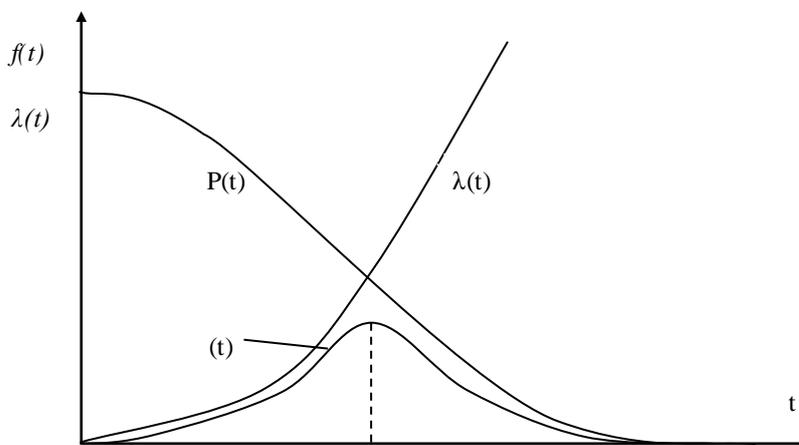


Рис. 4.5. Графики функций показателей безотказности при нормальном распределении

Параметр  $S$  характеризует форму кривой  $f(t)$ , т. е. рассеивание случайной величины  $T$ . Кривая плотности распределения  $f(t)$  тем выше и острее, чем меньше  $S$ . Она начинается от  $t = -\infty$  и распространяется до  $t = \infty$ . Это не является существенным недостатком, если  $T \geq 3S$ , так как площадь, очерченная уходящими в бесконечность ветвями кривой плотности, очень мала. Так, вероятность отказа за период времени до  $T = -3S$  составляет всего 0,135 % и обычно не учитывается в расчетах. Наибольшая ордината кривой плотности распределения равна  $0,399/S$  (рис. 4.6).

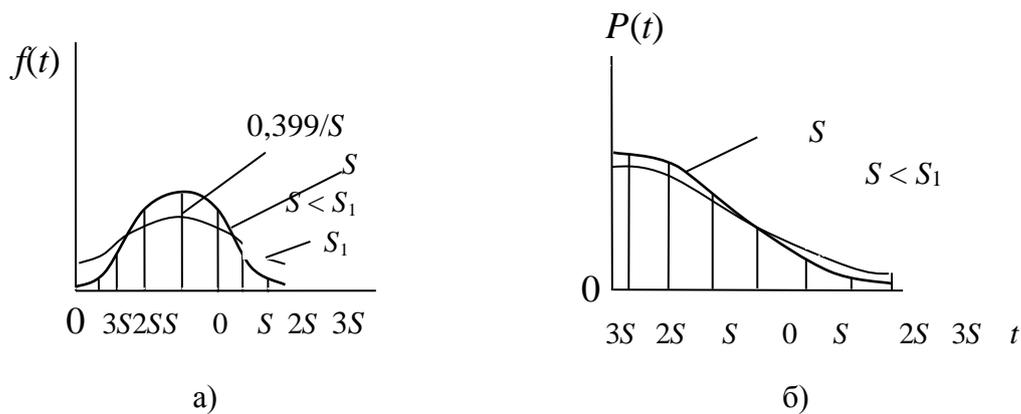


Рис. 4.6. Функция плотности вероятности (а) и интегральная функция вероятности нормального распределения (б)

Вероятность отказа при таком распределении определяется интегральной функцией

$$Q(t) = F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (4.13)$$

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - F(t) \quad (4.14)$$

$$P(t) = 1 - \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t-T)^2}{2S^2}\right) dt \quad (4.15)$$

Вычисление интегралов заменяют использованием таблиц значений  $P(t)$  в зависимости от квантили нормированного нормального распределения (табл. 4.2):

$$U_p = \frac{t-T}{S} \quad (4.16)$$

Помимо прямой задачи, т. е. оценки вероятности безотказной работы за данную наработку, зачастую требует решения обратное определение наработки, соответствующей заданной вероятности безотказной работы.

Значение этой наработки определяют также с помощью квантили:

$$t = T + U_p \cdot S. \quad (4.17)$$

Таблица 4.2

### Нормальное распределение

Квантиль $U_p$	Вероятность безотказной работы $P(t)$	Квантиль $U_p$	Вероятность безотказной работы $P(t)$
0,0	0,5000	-1,282	0,9000
-0,1	0,5398	-1,400	0,9192
-0,2	0,5793	-1,600	0,9452
-0,3	0,6179	-1,800	0,9641
-0,4	0,6552	-2,000	0,9772
-0,5	0,6915	-2,200	0,9861
-0,6	0,7257	-2,236	0,9900
-0,7	0,7580	-2,500	0,9938
-0,8	0,7881	-3,090	0,9990
-0,9	0,8159	-3,500	0,9998
-1,0	0,8413	-3,719	0,9999

Применение нормального закона ограничено, если мала вероятность отрицательных значений времени безотказной работы, заданная в виде:

$$P(t < 0) = \int_{-\infty}^0 \left( \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2S^2}} \right) dt < 0,05 \quad (4.18)$$

Если вероятность отрицательных значений времени безотказной работы оказывается достаточно большой величиной, то нормальное распределение для расчетов надёжности использовать нельзя. В этом случае переходят к логарифмически нормальному распределению вероятности безотказной работы.

При большем разбросе значений случайной величины  $T$  область возможных значений ограничивается слева  $(0, \infty)$  и используется усеченное нормальное распределение.

Все рассмотренные далее законы распределения наработки до отказа используются на практике для описания надёжности «стареющих» объектов, по подверженных отказам вследствие износа.

### 4.3.2. Усеченное нормальное распределение

Усеченным нормальным распределением называется распределение, получаемое из классического нормального при ограничении интервала возможных значений наработки до отказа.

Известно, что корректность использования классического нормального распределения наработки достигается при  $T \geq 3S$ .

При малых значениях  $T$  и большом  $S$  может возникнуть ситуация, когда функция  $f(t)$  «покрывает» своей левой ветвью область отрицательных наработок (рис. 4.7).

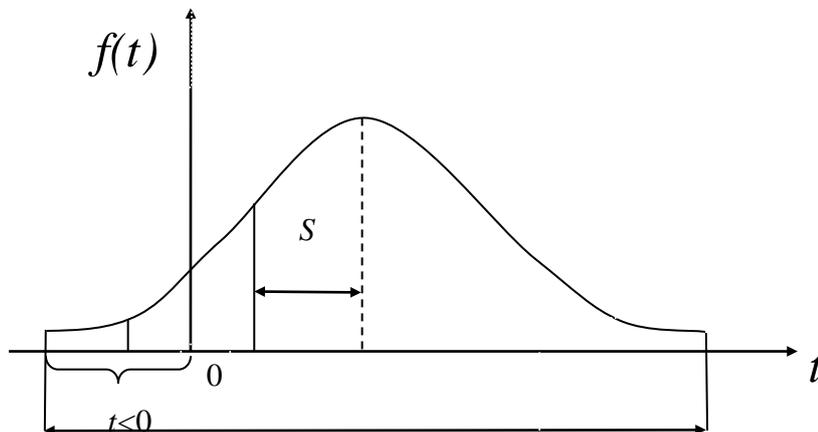


Рис. 4.7. Функция плотности вероятности усеченного нормального распределения

Таким образом, нормальное распределение, являясь общим случаем распределения случайной величины в диапазоне  $(-\infty; +\infty)$ , лишь в частности (при определенных условиях) может быть использовано для моделей надёжности.

В общем случае усечение может быть:

*левым* –  $(0; +\infty)$ ,

*двусторонним* –  $(t_1, t_2)$ .

Для рассмотрения количественных характеристик надёжности при усеченном нормальном распределении вводится нормирующий множитель, чтобы сохранить условие нормирования плотности вероятности:

$$\int_{t_1}^{\infty} cf(t)dt = c \int_{t_1}^{\infty} f(t)dt = 1, \quad (4.19)$$

где

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(t-T)^2}{2S^2}\right), \quad (4.20)$$

откуда

$$c = \frac{1}{\int_{t_1}^{t_2} f(t)dt}. \quad (4.21)$$

Переходя от случайной величины  $T = \{t\}$  к величине  $X = \{x\}$

$$x_2 = (t_2 - T)/S, \quad x_1 = (t_1 - T)/S,$$

получают

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t)dt = Q(t_2) - Q(t_1) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1),$$

откуда

$$c = \frac{1}{\Phi(x_2) - \Phi(x_1)}, \quad (4.22)$$

где  $\Phi(x)$  – интеграл Лапласа.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du.$$

Усеченный нормальный закон распределения применяется для описания постепенных отказов объектов, что характерно для «стареющих» объектов.

Поскольку  $[\Phi(x_2) - \Phi(x_1)] < 1$ , то  $c > 1$ , поэтому  $f_1(t) > f_2(t)$ . Здесь  $f_1(t)$  – функция плотности распределения отказов для нормального закона распределения,  $f_2(t)$  – функция плотности распределения отказов для усеченного нормального закона распределения. Кривая  $f_1(t)$  выше, чем  $f_2(t)$ , так как площади под кривыми  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  одинаковы и равны 1 (рис. 4.8):

$$\int_{m_t - 3S}^{m_t + 3S} f_2(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} f_1(t)dt \quad (\text{с погрешностью } \leq 1 \%).$$

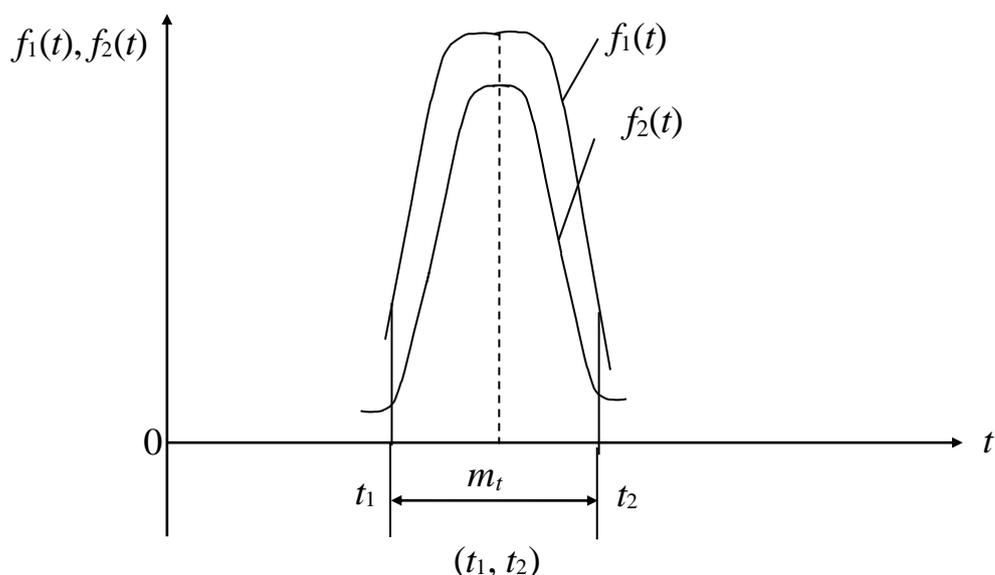


Рис. 4.8. Функция плотности распределения отказов для нормального закона распределения  $f_1(t)$  и функция плотности распределения отказов для усеченного нормального закона распределения  $f_2(t)$

### Контрольные вопросы

1. Почему распределение Гаусса называется нормальным?
2. Поясните влияние параметров распределения: математического ожидания и дисперсии по виду кривой плотности распределения отказов.
3. При каких условиях правильно использовать классическое нормальное распределение, а при каких – усечённое нормальное распределение?

#### 4.3.3. Логарифмически нормальное распределение

При логарифмически нормальном распределении нормально распределенным является логарифм ( $\lg t$ ) случайной величины  $T$ , а не сама эта величина.

Это распределение обеспечивает более точное, чем нормальное распределение, описание наработки до отказа тех объектов, у которых отказ возникает вследствие усталости, например подшипников качения, электронных ламп и пр.

Оно используется при обработке опытных данных об усталостной долговечности металлов, времени безотказной работы некоторых объектов.

Логарифмически нормальное распределение позволяет описывать течение времени безотказной работы объектов, имеющих свойство «упрочняться» по ходу времени эксплуатации. «Упрочнение» проявляется в постепенном уменьшении скорости износа.

Плотность распределения выражается (зависимостью)

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln t - m)^2}{2S^2}\right). \quad (4.23)$$

Параметры  $m$  и  $S$  по результатам  $N_N$  испытаний принимаются:

$$m \approx \bar{m} = \sum_{i=1}^N \ln t_i / N, \quad (4.24)$$

$$S \approx \bar{S} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\ln t_i - \bar{m})^2}. \quad (4.25)$$

Вероятность безотказной работы можно определить по таблице нормального распределения (см. табл. 4.2) в зависимости от значения квантили:

$$U_p = \frac{\ln t - m}{S}. \quad (4.26)$$

Математическое ожидание наработки до отказа:

$$m_t = \exp\left(m + 0,5S^2\right). \quad (4.27)$$

Среднее квадратическое отклонение

$$S_t = \sqrt{\exp(2m + S^2) \cdot (\exp(S^2) - 1)}. \quad (4.28)$$

Графики изменения показателей надежности при логарифмически нормальном распределении приведены на рис. 4.9.

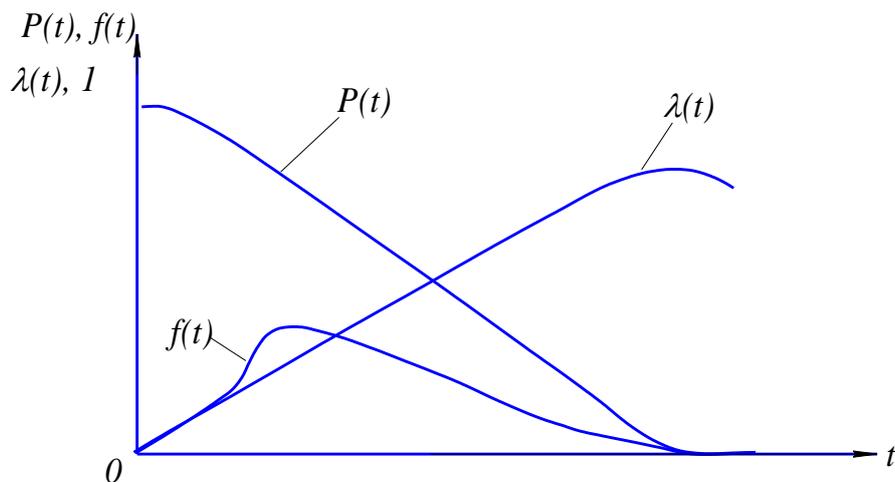


Рис. 4.9. Графики функций показателей безотказности при логарифмически нормальном распределении

#### 4.3.4. Гамма-распределение

Гамма-распределение времени безотказной работы описывает схему непрерывного, постепенного износа, при котором отказ не наступает вследствие первого же повреждения, а является следствием накопления повреждений. Каждое из этих повреждений происходит по схеме мгновенного повреждения.

Граничными условиями применения гамма-распределения являются следующие:

- средняя скорость износа устройства постоянна;
- средняя скорость износа подвержена случайным вариациям;
- начальное качество исследуемых устройств полностью однородно.

Случайная величина наработки до отказа  $T$  имеет гамма-распределение с параметрами  $\alpha$  (масштабный параметр) и  $\beta$  (параметр формы), где  $\alpha, \beta > 0$ , причём  $\beta$  – целое число, если функция плотности распределения описывается выражением:

$$f(t) = \frac{\alpha^\beta \cdot t^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \cdot \exp(-\alpha t), \quad (4.29)$$

где  $\Gamma(\beta) = (\beta - 1)!$  – гамма-функция Эйлера.

Очевидно, что при  $\beta = 1$  выражение (4.29) упрощается до вида  $f(t) = \alpha \cdot \exp(-\alpha t)$ , соответствующего экспоненциальному распределению.

Гамма-распределение наиболее хорошо описывает распределение суммы независимых случайных величин, каждая из которых распределена по экспоненциальному закону.

При больших значениях  $\beta$  гамма-распределение сходится к нормальному распределению с параметрами:  $T = \beta/\alpha$ ,  $S = \sqrt{\beta/\alpha^2}$ .

Графики изменения показателей надежности при гамма-распределении приведены на рис. 4.10.

Числовые характеристики наработки до отказа:

- средняя наработка (математическое ожидание наработки) до отказа

$$T = \beta/\alpha, \quad (4.30)$$

- дисперсия наработки до отказа

$$D = \beta/\alpha^2. \quad (4.31)$$

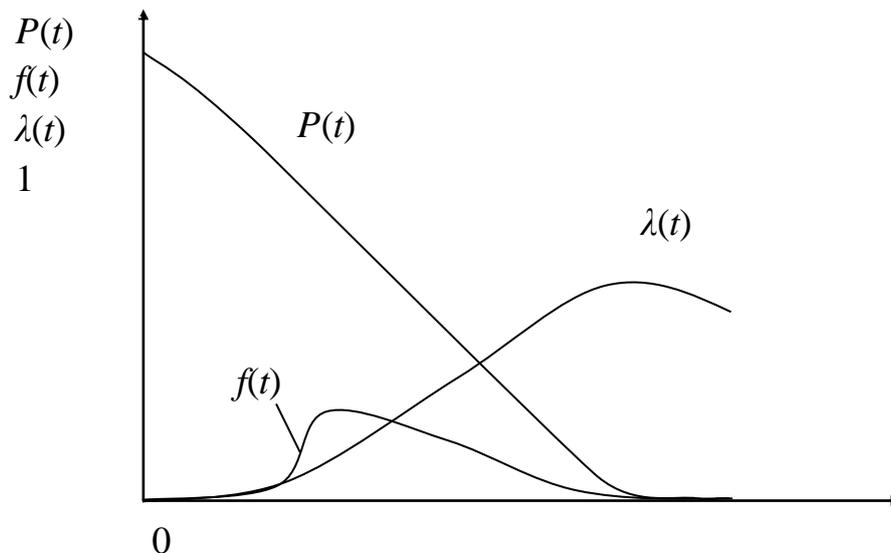


Рис. 4.10. Графики изменения показателей надежности при гамма-распределении

#### 4.3.5. Распределение Вейбулла – Гнеденко

Распределение Вейбулла – Гнеденко довольно универсально, охватывает путем варьирования параметров широкий диапазон случаев изменения вероятностей. Наряду с логарифмическим нормальным распределением оно удовлетворительно описывает наработку деталей по усталостным разрушениям, наработку до отказа подшипников, радиодеталей. Используется для оценки надежности деталей и узлов машин, в частности автомобилей, подъемно-транспортных и других машин. Применяется также для оценки надежности по приработочным отказам.

Распределение характеризуется следующей функцией вероятности безотказной работы:

$$P(t) = \exp\left(\frac{-t^m}{t_0}\right). \quad (4.32)$$

(Здесь  $t_0$  – значение времени, при котором плотность вероятности максимальна, в теории вероятностей носит название *мода*).

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1}. \quad (4.33)$$

Плотность распределения

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right) \quad (4.34)$$

Из формул (4.33) и (4.34) видно, что распределение Вейбулла – Гнеденко имеет два параметра: параметр формы  $m > 1$  и параметр масштаба  $t_0$ .

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение рассчитываются соответственно по формулам:

$$m_t = b_m t_0^{\frac{1}{m}}, \quad (4.35)$$

$$S_t = c_m t_0^{\frac{1}{m}}, \quad (4.36)$$

где  $b_m$  и  $c_m$  – коэффициенты, выбираемые по табл. 4.3.

Таблица 4.3

**Коэффициенты для расчёта параметров  $m_t$  и  $s_t$**

Параметр формы $m$	$1/m$	$b_m$	$c_m$	Коэффициент вариации $U = \frac{c_m}{b_m}$
0,400	2,5	3,32	10,4	3,14
0,455	2,2	2,42	6,22	2,57
0,500	2,0	2,00	4,47	2,24
0,556	1,8	1,68	3,26	1,94
0,625	1,6	1,43	2,39	1,67
0,833	1,2	1,10	1,33	1,21
1,2	0,833	0,941	0,787	0,837
1,6	0,625	0,897	0,574	0,640
2,0	0,500	0,887	0,463	0,523
2,5	0,400	0,886	0,380	0,428

Возможность и универсальность распределения Вейбулла – Гнеденко видны из следующих пояснений (рис. 4.11).

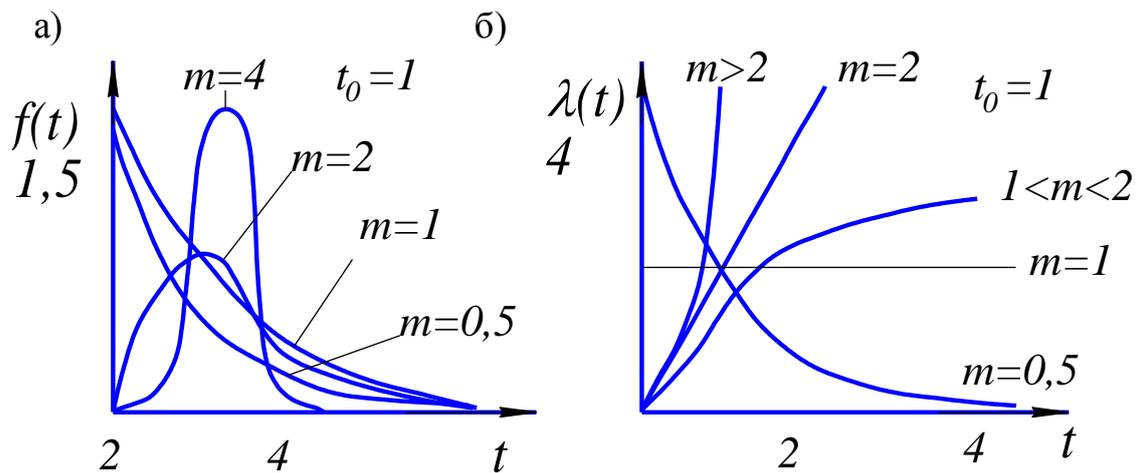


Рис. 4.11. Основные характеристики распределения Вейбулла – Гнеденко при разных параметрах  $m$ : а – плотность вероятности  $f(t)$ ; б – интенсивность отказов  $\lambda(t)$

При  $m < 1$  функции  $\lambda(t)$  и  $f(t)$  наработки до отказа убывающие.

При  $m = 1$  распределение превращается в экспоненциальное,  $\lambda(t) = \text{const}$  и  $f(t)$  – убывающая функция.

При  $m > 1$  функция  $f(t)$  – одновершинная, функция  $\lambda(t)$  непрерывно возрастающая, при  $1 < m < 2$  – с выпуклостью вверх, а при  $m > 2$  – с выпуклостью вниз.

При  $m = 2$  функция  $\lambda(t)$  является линейной и распределение Вейбулла – Гнеденко превращается в распределение Рэлея.

При  $m = 3,3$  распределение Вейбулла – Гнеденко близко к нормальному.

Кроме рассмотренных законов распределения, в качестве моделей надёжности объектов могут использоваться и другие, например распределение Рэлея, распределение Эрланга и т. д. [53].

## Контрольные вопросы

1. Перечислить виды распределений, описывающих надёжность в период постепенных отказов.

2. Для описания надёжности каких объектов используется логарифмически нормальное распределение?

3. Какой из параметров в выражении плотности распределения отказов при гамма-распределении наработки является параметром формы, а какой – параметром масштаба?

#### 4.4. Совместное действие внезапных и постепенных отказов

Вероятность безотказной работы изделия за период  $t$ , если до этого оно проработало время  $T$ , по теореме умножения вероятностей:

$$P(t) = P_e(t) \cdot P_n(t), \quad (4.37)$$

где  $P_e(t)$  и  $P_n(t)$  – вероятности отсутствия внезапных и постепенных отказов соответственно.

$$P_e(t) = \exp(-\lambda t), \quad (4.38)$$

$$P_n(t) = \frac{P_n(T+t)}{P_n(T)}. \quad (4.39)$$

На рис. 4.12 показаны вероятности отсутствия внезапных отказов и кривая вероятности безотказной работы при совместном действии внезапных и постепенных отказов.

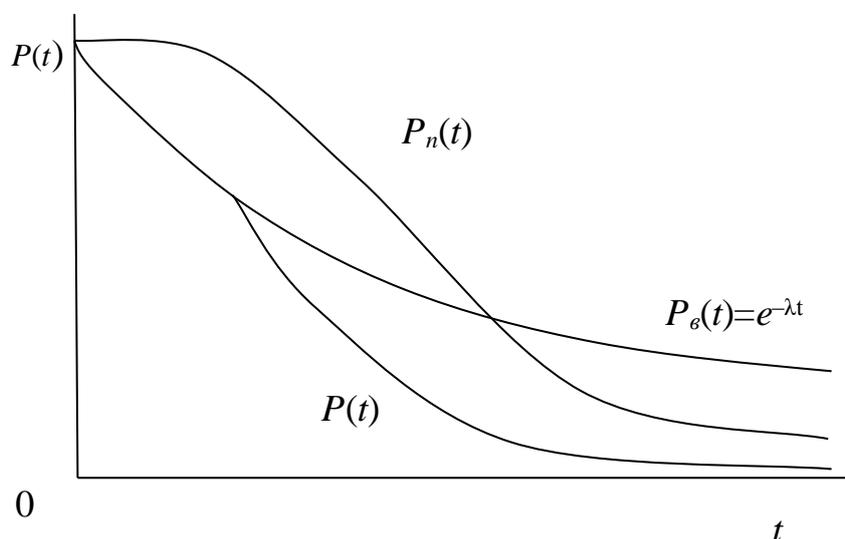


Рис. 4.12. Совместное действие внезапных и постепенных отказов

Вначале, когда интенсивность постепенных отказов низка, кривая  $P(t)$  соответствует кривой  $P_e(t)$ , затем резко снижается.

## 4.5. Надёжность восстанавливаемых объектов.

### Постановка задачи. Общая расчётная модель

При расчёте показателей надёжности 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 независимых отказах представить анализируемые системы в виде марковских систем.

При экспоненциальном распределении наработки между отказами и времени восстановления расчёт надёжности производится методом дифференциальных уравнений для вероятностей состояний (уравнений Колмогорова – Чепмена).

Случайный процесс в какой-либо физической системе  $S$  называется марковским (рис. 4.13), 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).

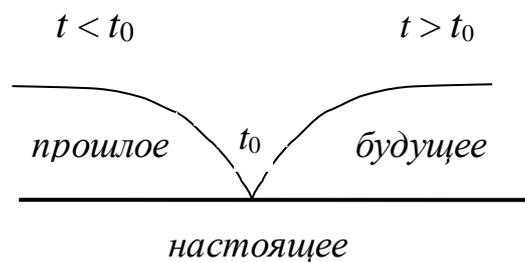


Рис. 4.13. Состояние системы

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.

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.

Для рассмотрения принципа составления модели введены допущения:

- 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  $S_1, S_2, \dots, S_n$ .

Основные правила составления модели:

1. Модель изображают в виде графа состояний.

Элементы графа:

а) кружки (вершины графа  $S_1, S_2, \dots, S_n$ ) – возможные состояния системы  $S$ , возникающие при отказах элементов; б) стрелки – возможные направления переходов из одного состояния  $S_i$  в другое  $S_j$ .

Над/под стрелками указываются интенсивности переходов.

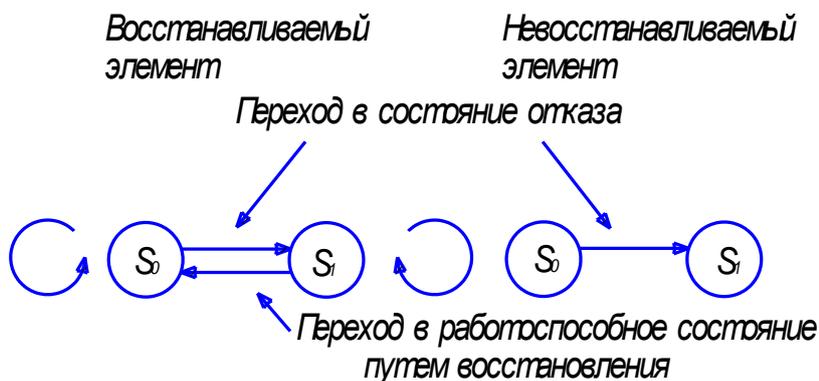


Рис. 4.14. Примеры графа:  $S_0$  – работоспособное состояние;  $S_1$  – состояние отказа

«Петлей» обозначаются задержки в том или ином состоянии  $S_0$  и  $S_1$ , а именно:

$S_0$  – исправное состояние продолжается;

$S_1$  – состояние отказа продолжается (в дальнейшем петли на графах не рассматривают).

Граф состояний отражает конечное (дискретное) число возможных состояний системы  $S_1, S_2, \dots, S_n$ . Каждая из вершин графа соответствует одному из состояний.

2. 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, т. е.  $P_i(t) = P\{S(t) = S_i\}$ .

Очевидно, что для любого  $t$

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1 \quad (4.40)$$

3. По графу состояний составляется система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (уравнений Колмогорова – Чепмена), имеющих вид:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{l=1}^{\theta} \lambda_{li} \cdot P_l(t) - P_i(t) \sum_{j=1}^q \lambda_{ij}; \quad j = \overline{l, q}; \quad l = 1, \dots, \theta \quad (4.41)$$

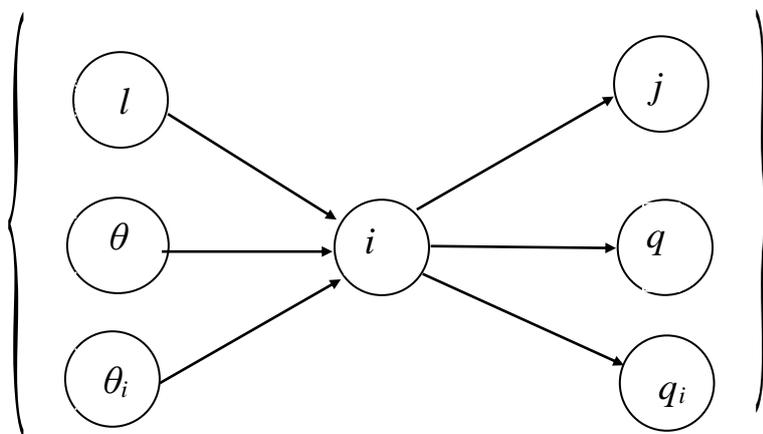


Рис. 4.15. Граф состояний

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 записывается производная по времени  $t$  от  $P_i(t)$ ;
- б) в правой части число членов 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 (направлена острием) в рассматриваемое состояние, и отрицателен, если стрелка выходит из него.

Проверкой правильности составления уравнений является равенство нулю суммы правых частей уравнений.

4. 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  $t = 0$  их сумма равна единице:

$$\sum_{i=1}^n P_i(0) = 1$$

Если в начальный момент  $t = 0$  состояние системы известно, например,  $S(t = 0) = S_i$ , то  $P_i(0) = 1$ , а остальные равны нулю.

#### 4.5.1. Показатели надёжности восстанавливаемых объектов

Все состояния системы  $S$  можно разделить на подмножества:

$S_K \subset S$  – подмножество состояний  $j = \overline{1, K}$ , в которых система работоспособна (читается « $S_K$  принадлежит  $S$ »);

$S_M \subset S$  – подмножество состояний  $z = \overline{1, M}$ , в которых система неработоспособна;

$S = S_K \cup S_M$  (читается « $S_K$  или  $S_M$ », « $S_K$  дизъюнкция  $S_M$ »);

$S_K \cap S_M = \emptyset$  (читается « $S_K$  и  $S_M$ », « $S_K$  конъюнкция  $S_M$ »).

1. Функция готовности  $\Gamma(t)$  системы определяет вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии в момент  $t$ :

$$\Gamma(t) = \sum_{j=1}^K P_j(t) = 1 - \sum_{z=1}^M P_z(t), \quad (4.42)$$

где  $P_j(t)$  – вероятность нахождения системы в работоспособном  $j$ -м состоянии;

$P_z(t)$  – вероятность нахождения системы в неработоспособном  $z$ -м состоянии.

2. Функция простоя  $\Pi(t)$  системы:

$$\Pi(t) = 1 - \Gamma(t) = \sum_{z=1}^M P_z(t) \quad (4.43)$$

3. Коэффициент готовности  $k_{z.c}$  системы определяется 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:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t) = P_i; \quad i = \overline{1, n}$$

Коэффициент готовности  $k_{z.c}$  можно рассчитать по системе (4.41) дифференциальных уравнений, приравнявая нулю их левые части  $dP_i(t)/dt = 0$ , так как  $P_i = \text{const}$  при  $t \rightarrow \infty$ . Тогда система уравнений (4.41) превращается в систему алгебраических уравнений вида:

$$0 = \sum_{l=1}^q \lambda_{li} P_l - P_i \sum_{j=1}^q \lambda_{ij} \quad (4.44)$$

и коэффициент готовности

$$k_{z.c} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t) \quad (4.45)$$

есть предельное значение функции готовности при установившемся режиме  $t \rightarrow \infty$ .

4. Параметр потока отказов системы

$$\mu(t) = \sum_{j=1}^q \sum_{z=1}^M \lambda_{jz} P_j(t) \quad (4.46)$$

где  $\lambda_{jz}$  – интенсивности (обобщенное обозначение) переходов из работоспособного состояния в неработоспособное.

5. Функция потока отказов:

$$M(t) = \int_0^t \mu(t) dt \quad (4.47)$$

6. Средняя наработка между отказами на интервале  $t$ :

$$T_0(t) = \frac{\int_0^t \Gamma(t) dt}{M(t)} \quad (4.48)$$

Примечание: при  $t \rightarrow \infty$ , когда  $P_j(t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} P_j(\infty) = P_j$ , средняя наработка между отказами  $T_0 = k_{z.c} / \lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t) = k_{z.c} / \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_0^t \mu(\bar{t}) d\bar{t}}{t} = k_{z.c} / \mu = T_0$

при условии:  $\lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t) = k, \lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t) = \mu.$

В качестве примера вычисления показателей надежности рассмотрен во становливаемый объект, у которого поток отказов простейший (пуассоновский) с параметром потока

$$\mu = \lambda = 1/T, \tag{4.49}$$

а распределение времени восстановления подчиняется экспоненциальному распределению с интенсивностью восстановления

$$\mu = 1/T_B, \tag{4.50}$$

где  $T$  – средняя наработка между отказами;  $T_B$  – среднее время восстановления.

Состояния элемента:  $S_0$  – работоспособное;  $S_1$  – неработоспособное (рис. 4.16);  $P_0(t)$  – вероятность работоспособного состояния при  $t$ ;  $P_1(t)$  – вероятность неработоспособного состояния при  $t$ .

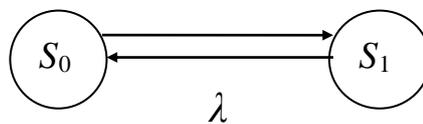


Рис. 4.16. Граф состояний восстанавливаемого объекта

Система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} dP_0(t)/dt = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ dP_1(t)/dt = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t). \end{cases} \tag{4.51}$$

Начальные условия: при  $t = 0$   $P_0(t = 0) = P_0(0) = 1$ ;  $P_1(0) = 0$ .

Поскольку состояния  $S_0$  и  $S_1$  представляют полную группу событий, то

$$P_0(t) + P_1(t) = 1. \quad (4.52)$$

Путём выражения  $P_0(t) = 1 - P_1(t)$  и подстановки в (4.51) получено одно дифференциальное уравнение относительно  $P_1(t)$ :

$$dP_1(t)/dt = \lambda(1 - P_1(t)) - \mu P_1(t). \quad (4.53)$$

Решение уравнения производится с использованием преобразования Лапласа. Преобразование Лапласа для вероятностей состояния  $P_i(t)$ :

$$P_i(S) = \int_0^{\infty} P_i(t) e^{-St} dt,$$

где  $P_i(S) = L\{P_i(t)\}$  – изображение вероятности  $P_i(t)$ .

Преобразование Лапласа для производной  $dP_i(t)/dt$ :

$$L\{dP_i(t)/dt\} = \int_0^{\infty} (dP_i(t)/dt) \cdot e^{-St} dt = -P_i(0) + SP_i(S)$$

После применения преобразования Лапласа к левой и правой частям уравнения получено уравнение изображений:

$$\begin{aligned} L\{dP_1(t)/dt\} &= L\{\lambda - P_1(t)(\lambda + \mu)\}, \\ L\{dP_1(t)/dt\} &= L\{\lambda\} - L\{P_1(t)(\lambda + \mu)\}, \\ -P_1(0) + SP_1(S) &= \lambda/S - P_1(S)(\lambda + \mu), \end{aligned}$$

где  $L\{\lambda\} = \lambda L\{1\} = \lambda/S$ .

При  $P_1(0) = 0$

$$SP_1(S) + P_1(S)(\lambda + \mu) = \lambda/S,$$

$$P_1(S)(S + \lambda + \mu) = \lambda/S.$$

Преобразованием приведенных соотношений получено выражение вероятности нахождения объекта в неработоспособном состоянии:

$$P_1(S) = \frac{\lambda}{S(S + \lambda + \mu)}. \quad (4.54)$$

Введение обозначения  $\lambda + \mu = a$  позволяет преобразовать правую часть выражения (4.54):

$$\frac{\lambda}{S(S + \lambda + \mu)} = \frac{a - \mu}{S(S + a)} = \frac{a - \mu}{a} \cdot \frac{a}{S(S + a)} = \frac{a - \mu}{a} \left[ \frac{1}{S} + \frac{1}{S + a} \right]$$

Применяя обратное преобразование Лапласа, с учётом  $L\{f(t)\} = 1/S$ , а также  $f(t) = 1$ ;  $L\{f(t)\} = 1/(S + a)$ , получают  $f(t) = e^{-at}$ , после чего находят вероятность пребывания объекта в неработоспособном состоянии в виде выражения:

$$P_i(t) = \frac{a - \mu}{a} \left[ 1 - e^{-at} \right] = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \left[ 1 - e^{-(\lambda + \mu)t} \right] \quad (4.55)$$

Тогда вероятность нахождения в работоспособном состоянии  $P_0(t) = 1 - P_1(t)$  равна:

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ 1 + \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right] \quad (4.56)$$

С помощью полученных выражений можно рассчитать вероятность работоспособного состояния и отказа восстанавливаемого объекта в любой момент  $t$ .

Коэффициент готовности системы  $k_{z.c}$  определяется при установившемся режиме  $t \rightarrow \infty$ , при этом  $P_i(t) = P_i = \text{const}$ , поэтому составляется система алгебраических уравнений с нулевыми левыми частями, поскольку  $dP_i(t)/dt = 0$ .

Так как  $k_{z.c}$  есть вероятность того, что система окажется работоспособной в момент  $t$  при  $t \rightarrow \infty$ , то из полученной системы уравнений определяется

$$P_0 = k_{z.c}.$$

При  $t \rightarrow \infty$  алгебраические уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda P_0 + \mu P_1; \\ 0 = \lambda P_0 - \mu P_1. \end{cases} \quad (4.57)$$

Дополнительное уравнение:  $P_0 + P_1 = 1$ .

При  $P_1 = 1 - P_0$  получается  $0 = \lambda P_0 - \mu(1 - P_0)$ , или  $\mu = P_0 (\lambda + \mu)$ ,  
откуда

$$P_0 = k_{z.c} = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)}. \quad (4.58)$$

Остальные показатели надежности восстанавливаемого элемента:

- функция готовности  $\Gamma(t) = P_0(t)$ ;
- функция простоя  $\Pi(t) = 1 - \Gamma(t) = P_1(t)$ ;
- параметр потока отказов  $\mu(t) = \lambda P_0(t) = \lambda \Gamma(t)$ ,

при  $t \rightarrow \infty$  (стационарный установившийся режим восстановления)

$$\mu(t) = \mu(\infty) = \mu = \lambda P_0 = \lambda k_{z.c};$$

– ведущая функция потока отказов

$$\Gamma(t) = P_0(t); \Pi(t) = 1 - \Gamma(t) = P_1(t);$$

– средняя наработка между отказами  $t_0 = k_{z.c} / \mu = k_{z.c} / k_z = 1 / \lambda$ .

Метод дифференциальных уравнений может быть использован для расчёта показателей надёжности и невосстанавливаемых объектов (систем).

В этом случае неработоспособные состояния системы являются «поглощающими» и интенсивности  $\lambda$  выхода из этих состояний исключаются.

Для невосстанавливаемого объекта граф состояний имеет вид (рис. 4.17):



Рис. 4.17. Граф состояний невосстанавливаемого объекта

Система дифференциальных уравнений для данного объекта:

$$\begin{cases} dP_0(t) / dt = -\lambda P_0(t); \\ dP_1(t) / dt = \lambda P_0(t). \end{cases}$$

Начальные условия:  $P_0(0) = 1; P_1(0) = 0$ .

Изображение по Лапласу первого уравнения системы:

$$\begin{aligned} L\{dP_0(t) / dt\} &= -\lambda L\{P_0(t)\}, \\ -P_0(0) + SP_0(S) &= -\lambda P_0(S). \end{aligned}$$

После группировки:  $SP_0(S) + \lambda P_0(S) = 1,$

$$P_0(S)(S + \lambda) = 1,$$

$$P_0(S) = \frac{1}{S + \lambda}.$$

откуда

Используя обратное преобразование Лапласа, получают

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}.$$

#### 4.5.2. Связь логической схемы надёжности с графом состояний

Переход от логической схемы к графу состояний необходим:

- при смене методов расчёта надёжности и сравнении результатов;
- для оценки выигрыша в надёжности при переходе от невосстанавливаемой системы к восстанавливаемой.

Рассматриваются типовые логические структуры надёжности. Для невосстанавливаемых систем граф – однонаправленный, переходы характеризуются интенсивностями отказов  $\lambda$ .

Для восстанавливаемых систем в графах состояний добавляются обратные стрелки, соответствующие интенсивностям восстановлений  $\lambda_B$  (табл. 4.4).

Таблица 4.4

#### Типовые логические структуры надёжности

Структурная логическая схема	Графы состояний	
	Элементы различной надёжности	Равнонадежные элементы

Обозначения на графах состояний:

1 – работоспособное состояние элемента,

0 – неработоспособное состояние элемента.

## Контрольные вопросы

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.

### 4.6. Пример расчёта безотказности с использованием модели «прочность – нагрузка»

1. Рассчитать элемент, на который действует растягивающая нагрузка (рис. 4.18).

Принимается, что растягивающая нагрузка  $P$  и предел прочности на растяжение  $s$  являются случайными величинами, подчиняющимися нормальному закону распределения вероятностей с параметрами соответственно:  $P = 17\,800$  Н,  $\sigma_P = 445$  МПа и  $s = 690$  МПа,  $\sigma_s = 34,5$  МПа. Заданное значение безотказности  $R_3 = 0,9999$ .



Рис. 4.18. Элемент, на который действует растягивающая нагрузка

**Решение:** растягивающее напряжение определяется по формуле  $s = p / A$ , где  $A = \pi \cdot r^2$ . Допуск на радиус выражается в виде доли  $\alpha$  от номинального значения  $r$ :  $3\sigma_p = \alpha \cdot r$ ,  $\sigma_r = \alpha / 3 \cdot \bar{r}$ .

По формулам расчета математического ожидания и среднеквадратического отклонения линейной функции случайной величины получается:  $\bar{A} = \pi \bar{r}^2$ ;

$$\sigma = \partial \bar{A} / \partial r_{r=\bar{r}}; \quad \sigma_r = 2\pi \bar{r} \sigma_r; \quad \bar{s} = \bar{p} / \bar{A} = \bar{p} / (\pi \bar{r}^2);$$

$$\sigma_s^2 = \left( \frac{\partial s}{\partial p} \right)_{p=\bar{p}}^2 \cdot \sigma_p^2 + \left( \frac{\partial s}{\partial r} \right)_{r=\bar{r}}^2 \cdot \sigma_r^2 =$$

$$= \frac{\pi^2 r^{-4} \sigma_p^2 + 4\pi^2 r^{-4} \left( \frac{\alpha}{3} \right)^2 \bar{p}^2}{\pi^4 \bar{r}^8} = \frac{\sigma_p^2 + \frac{4}{9} \alpha^2 \bar{p}^2}{\pi^2 \bar{r}^4}.$$

Плотность распределения прочности:

$$f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2}} \exp\left\{-\frac{(S - \bar{S})^2}{2\sigma_s^2}\right\}$$

Плотность распределения нагрузки:

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2}} \exp\left\{-\frac{(s - \bar{s})^2}{2\sigma_s^2}\right\}$$

Плотность распределения разности  $S - s$ , соответственно, имеет вид:

$$f(S - s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_s^2 + \sigma_s^2)}} \exp\left\{-\frac{[(S - \bar{S}) - (s - \bar{s})]^2}{2(\sigma_s^2 + \sigma_s^2)}\right\}$$

Условие параметрической безотказности определяется равенством:

$$R = P\{S - s > 0\}.$$

Статистический запас прочности находится из выражения для  $P(S - s)$ :

$$\sqrt{\sigma_s^2 + \left( \sigma_p^2 + \frac{4}{9} \alpha^2 \bar{p}^2 \right) / \pi^2 \bar{r}^4}$$

где  $Z$  – квантиль стандартного нормального распределения.

Для  $R_3 = 0,9999$  по таблицам стандартного нормального распределения находится  $Z = 3,72$ . При  $\alpha = 0,015$  по формуле (4.15) получаем  $(17,86 - 10^6)$

$$Z = 3,72 \left[ \frac{4 \left( 0,015^2 (17,86 - 10^6) \right)}{9 \pi^2 \bar{r}^4} + \frac{690 \cdot 10^6 - \frac{17,8 \cdot 10^3}{\pi \bar{r}^2}}{\pi^2 \bar{r}^4} \right]^{1/2}$$

откуда  $144,6 \bar{r}^4 - 24,6 \bar{r}^2 + 1 = 0$  и окончательно для положительных корней уравнения  $\bar{r}_1 = 2,60$  мм;  $\bar{r} = 3,21$  мм, соответственно  $R = 0,0001$ ;  $R = 0,9999$ .

Влияние допуска  $\alpha$  и изменчивости прочности материала на надежность элемента представлено в табл. 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5

**Влияние допуска на надёжность**

$\alpha$ , %	1,5	1,5	5	7
$Z$	3,72	3,61	3,36	3,1
$R$	0,9999	0,9998	0,9996	0,999

Таблица 4.6

**Влияние прочности материала на надёжность**

$\sigma_s$ , МПа	34,5	41,4	48,3	55,2	62,1	68,9
$R$	0,9999	0,999	0,999	0,992	0,984	0,974

2. Рассчитать вал, на который действует скручивающая нагрузка  $T$  (рис. 4.19).

Заданное значение безотказности  $R_3 = 1130$  Н·м. Крутящий момент характеризуется параметрами  $T = 11\,300$  Н·м,  $\sigma_T = 1130$  Н·м. Допустимое срезающее напряжение ограничивается значениями  $S = 345$  МПа,  $\sigma_s = 34,5$  МПа. Принимается изменчивость радиуса вала  $\sigma_r = (\alpha/3) \cdot \bar{r}$ .

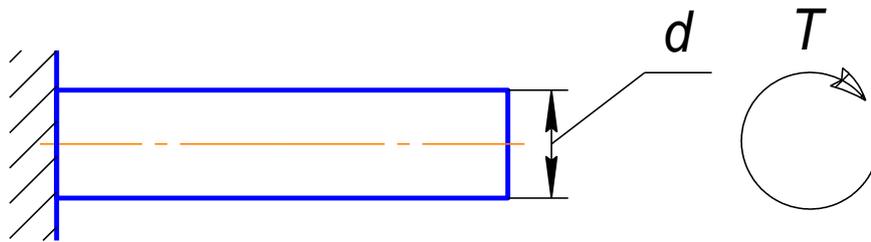


Рис. 4.19. Действие скручивающей нагрузки на вал

**Решение:** напряжение среза определяется по формуле

$$\tau = \frac{1}{2} G \theta d$$

где  $G$  – модуль упругости;  $\theta$  – угол закручивания на единицу длины;  $d$  – диаметр вала.

Крутящий момент  $T = G \theta I_p$ , где  $I_p$  – полярный момент инерции вала.

Для круглого вала сплошного сечения

$$I_p = \pi d^4 / 32; \quad G \theta = 2T / I_p = 32T / \pi d^4; \quad \tau = 2T / \pi r^3.$$

Применяя приближённые формулы расчёта, получают:

$$\bar{\tau} = 2T / \pi r^3 = 2 \cdot 11300 / \pi \bar{r}^3;$$

$$y_\phi = \sqrt{\frac{4y_T^2}{p^2 \bar{r}^2} + \frac{36\bar{\tau}^2 y_r^2}{p^2 \bar{r}^2}} = \frac{2 \cdot 11300}{p \bar{r}^2} \sqrt{1 + (10 \cdot 6)^2}.$$

Для  $R_z = 0,999$  из таблиц стандартного нормального распределения выбирается  $Z = 3,09$ . Таким образом,

$$3,09 = \frac{3,45 \cdot 10^6 - 2 \cdot 11300 / \pi \cdot \bar{r}^3}{\sqrt{(3,45 \cdot 10^6)^2 + (2 \cdot 11300 / \pi \cdot \bar{r}^3)^2 \cdot (1 + 100 \cdot \alpha)^2}}.$$

Выбирая  $\alpha = 0,03$ , получают:  $\bar{r}^6 - 46,105 \cdot \bar{r}^3 + 0,8666 = 0$  и окончательно для корней уравнения  $\bar{r}_1 = 32,131$  и  $\bar{r}_2 = 23,475$  получают соответственно  $R = 0,999$  и  $R = 0,001$ .

Влияние допуска  $\alpha$  и прочности материала на надёжность  $R$  видно из табл. 4.7 и 4.8. В табл. 4.9 показано влияние радиуса вала на надёжность  $R$ .

Таблица 4.7

**Влияние допуска на надёжность**

$\alpha$ , %	3	4	5	10
$Z$	3,099	3,072	3,035	2,772
$R$	0,999 03	0,9969	0,9988	0,9974

Таблица 4.8

**Влияние прочности материала на надёжность**

$\sigma_s$ , МПа	34,475	41,37	55,166	68,95
$Z$	3,099	2,712	2,145	1,763
$R$	0,999 03	0,9964	0,984 22	0,960 80

Таблица 4.9

**Влияние радиуса вала на надёжность**

$\bar{r}$ , мм	30,48	32,131	35,56	40,64
$Z$	2,086	3,09	4,824	6,555
$R$	0,981 69	0,999	0,9999	0,999 99

## **5. СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **5.1. Надёжность систем.**

#### **Структурная схема надёжности системы**

Оценка надёжности является одним из элементов сложной системы управления риском, предполагающей выполнение таких работ, как идентификация и анализ риска, оценка пределов его допустимости и возможностей уменьшения путем выбора, осуществления и контроля управляющих действий.

Расчёт надёжности технических систем производится с целью выбора лучших конструктивных решений, режимов эксплуатации, организации технического обслуживания и ремонта. Задачами надёжности являются определение числовых показателей, выявление наиболее ненадежных элементов, определение наиболее эффективных мер повышения показателей надёжности. Решение этих задач возможно после предварительного структурно-логического анализа системы.

Объект, как было ранее сказано, есть техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Большинство технических объектов представляют собой сложные системы, состоящие из отдельных деталей, узлов, агрегатов, устройств контроля, управления и т. д. Техническая система (ТС) – совокупность технических устройств (элементов), предназначенных для выполнения определенной функции или функций. Соответственно, элемент – составная часть системы.

Расчленение ТС на элементы достаточно условно и зависит от постановки задачи расчета надёжности. Например, при анализе работоспособности технологической линии её элементами могут считаться отдельные установки и станки, транспортные и загрузочные устройства и т. д. В свою очередь, станки и устройства также могут считаться техническими системами и при оценке их надёжности должны быть разделены на элементы – комплексы, комплекты, сборочные единицы, детали, согласно классификации ЕСКД.

При определении структуры ТС в первую очередь необходимо оценить влияние каждого элемента и его работоспособности на работоспособность системы в целом. С этой точки зрения целесообразно разделить все элементы на четыре группы:

1. Элементы, состояние которых практически не влияет на работоспособность системы (например, деформация кожуха, изменение окраски поверхности и т. п.).

2. Элементы, работоспособность которых за время эксплуатации практически не изменяется и вероятность безотказной работы близка к единице (корпусные детали, малонагруженные элементы с большим запасом прочности).

3. Элементы, ремонт или регулировка которых возможна при работе изделия или во время планового технического обслуживания (наладка или замена технологического инструмента оборудования и т. д.).

4. Элементы, отказ которых сам по себе или в сочетании с отказами других элементов приводит к отказу системы.

Очевидно, что при анализе надежности ТС целесообразно включать в рассмотрение только элементы последней группы.

Подход к объекту как к одному целому не позволяет выявить наиболее слабый элемент.

Для составления структурной схемы изделие разбивают на элементы, а затем рассматривают влияние отказа произвольно взятого элемента на надежность всего объекта.

Вводятся уточнения:

– если отказ элемента приводит к отказу всего объекта, то элемент считается встроенным в структурную схему *последовательно*;

– если отказ элемента не приводит к отказу всего объекта, то элемент считается встроенным в структурную схему *параллельно*.

При составлении структурной схемы придерживаются следующих правил:

– элементы изображаются в виде прямоугольников и обозначаются или номерами, или индексами, например 1, а;

– одна сторона прямоугольника считается входом, другая – выходом для сигнала;

– элемент считается работоспособным, если сигнал со входа элемента проходит на выход;

– отказ элемента делает невозможным прохождение сигнала;

– линии, соединяющие элементы друг с другом, считаются абсолютно безотказными.

Системы различаются:

– по принципу действия (механическая часть, электрическая часть, гидравлическая часть);

– по характеру выполняемых работ;

– по операциям, выполняемым машиной в течение цикла.

Степень деления может быть разной. Для расчета и оценки критериев надежности подсистем достаточным будет их представление в виде отдельных сборочных элементов (корпус, вентилятор, воздухопровод и т. п.).

Если же поставленная задача включает оптимизацию конструкции отдельных элементов, то деление должно быть более глубоким и доходить до уровня отдельных деталей.

Цель расчёта надёжности:

- обосновать выбор того или иного конструктивного решения;
- выяснить возможность и целесообразность резервирования;
- выяснить, достижима ли требуемая надежность при существующей технологии разработки и производства.

Анализ структурной надежности ТС, как правило, содержит следующие операции:

1) рассматриваются выполняемые системой и её составными частями функции, а также взаимосвязь составных частей;

2) формируется содержание понятия «безотказной работы» для данной конкретной системы;

3) определяются возможные отказы составных частей и системы, их причины и возможные последствия;

4) оценивается влияние отказов составных частей системы на ее работоспособность;

5) в системе выделяются элементы с известными показателями надежности;

6) составляется структурно-логическая схема надёжности технической системы, которая является моделью её безотказной работы;

7) составляются расчётные зависимости для определения показателей надёжности ТС с использованием данных по надёжности её элементов и с учётом структурной схемы;

8) в зависимости от поставленной задачи на основании результатов расчёта характеристик надёжности ТС делаются выводы и принимаются решения о необходимости изменения или доработки элементной базы, резервировании отдельных элементов или узлов, об установлении определённого режима профилактического обслуживания, о номенклатуре и количестве запасных элементов для ремонта и т. д.

Для расчётов параметров надёжности удобно использовать *структурно-логические схемы надёжности ТС*, которые графически отображают взаимосвязь элементов и их влияние на работоспособность системы в целом. Струк-

турно-логическая схема представляет собой совокупность ранее выделенных элементов, соединенных друг с другом последовательно или параллельно. Критерием для определения вида соединения элементов (последовательного или параллельного) при построении схемы является влияние их отказа на работоспособность ТС.

*Последовательным* (с точки зрения надёжности) считается соединение, при котором отказ любого элемента приводит к отказу всей системы (рис. 5.1).

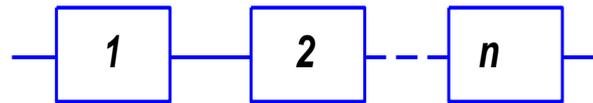


Рис. 5.1. Последовательное соединение элементов

*Параллельным* (с точки зрения надёжности) считается соединение, при котором отказ любого элемента не приводит к отказу системы, пока не откажут все соединенные элементы (рис. 5.2).

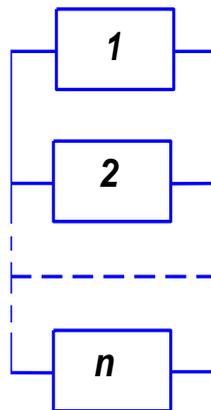


Рис. 5.2. Параллельное соединение элементов

Определенная аналогия здесь прослеживается с электрической цепью, составленной из проводящих элементов (исправный элемент пропускает ток, отказавший – не пропускает): работоспособному состоянию ТС соответствует возможность протекания тока от входа до выхода цепи.

Наиболее наглядным примером последовательных систем могут служить автоматические станочные линии без резервных цепей и накопителей. В них название реализуется буквально. Однако понятие «последовательная система» в задачах надёжности шире, чем в задачах электротехники. К последовательным системам относятся все системы, в которых отказ элементов приводит

к отказу всей системы. Примером параллельных систем являются электрические системы из электрических машин, работающих на общую сеть, многомоторные самолеты, суда с двумя машинами и резервные системы.

Однако не всегда структурная схема надежности аналогична конструктивной или электрической схеме расположения элементов. Например, подшипники на валу редуктора работают конструктивно параллельно друг с другом, однако выход из строя любого из них приводит к отказу системы. Эти элементы с точки зрения надежности образуют последовательное соединение.

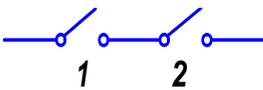
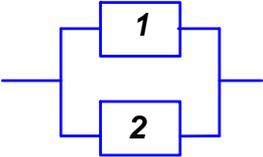
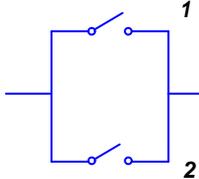
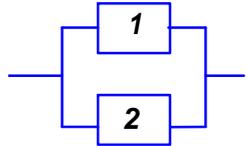
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА	СТРУКТУРНАЯ СХЕМА НАДЁЖНОСТИ ПРИ ОТКАЗЕ ТИПА	
	обрыв	замыкание
		
		

Рис. 5.3. Электрические и структурные схемы соединения коммутационных элементов при различных видах отказов

Кроме того, на структуру схемы надежности может оказывать влияние и вид возникающих отказов. Например, в электрических системах для повышения надежности в ряде случаев применяют параллельное или последовательное соединение коммутирующих элементов (рис. 5.3). Отказ таких изделий может происходить по двум причинам: обрыв (т. е. невозможность замыкания цепи) и замыкание (т. е. невозможность разрыва соединения). В случае отказа типа «обрыв» схема надежности соответствует электрической схеме системы («обрыв» в любом коммутаторе при последовательном соединении элементов приводит к отказу, при параллельном соединении все функции управления выполняет исправный коммутатор). В случае отказа типа «замыкание» схема надежности противоположна электрической (при параллельном соединении утратится возможность отключения тока, а при последовательном соединении общего отказа не происходит).

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные цели и задачи расчета показателей надежности систем?
2. Перечислите и поясните основные этапы расчета надежности систем.
3. Что такое структурная схема надежности?
4. Назовите правила составления структурной схемы.
5. Как производится разбивка элементов по системам?
6. Зачем используется структурная схема безотказности изделия?

### 5.2. Расчёт надёжности систем

#### с последовательным соединением элементов

Работоспособность системы с последовательным соединением элементов обеспечивается при условии, когда все  $n$  элементов системы находятся в работоспособном состоянии (рис. 5.4).

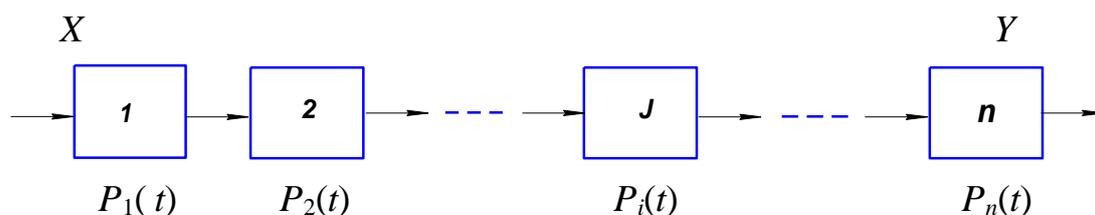


Рис. 5.4. Расчётная схема последовательного соединения элементов

Безотказность работы  $i$ -го элемента зависит от безотказности других:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_i(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) ; \quad (5.1)$$

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) ; \quad (5.2)$$

$$P_i(t) = e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} ;$$

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \lambda_c(t) dt} ; \quad (5.3)$$

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) ; \quad (5.4)$$

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} . \quad (5.5)$$

Если все элементы одинаковы, то:

1) при  $n = 30$   $P_1 = P_2 = \dots = P_i = \dots = P_n$ ;

$$P_c(t) = P(t)^n;$$

$$P(t) = 0,99;$$

$$P_c(t) = 0,99^{30} = 0,7397;$$

2) при  $n = 500$

$$P_c(t) = 0,0066.$$

Из (5.3)–(5.4) следует, что для системы из  $n$  элементов с одинаковой надёжностью ( $\lambda = \lambda_1$ ) верно условие:

$$\lambda_c = n\lambda ; \quad (5.6)$$

$$T_0 = \frac{T_{0i}}{n} ; \quad (5.7)$$

т. е. интенсивность отказов в  $n$  раз больше, а средняя наработка в  $n$  раз меньше, чем у отдельного элемента. При последовательном соединении общая надёжность всей системы ниже надёжности самого слабого элемента. При очень большом количестве высоконадёжных элементов система может оказаться неработоспособной.

Повысить надёжность такой системы можно за счёт выполнения следующих действий:

- увеличения надёжности составных элементов;
- сокращения количества элементов;
- уменьшения интенсивности отказов (за счёт уменьшения времени эксплуатации).

### **Контрольные вопросы и задачи**

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. Структура проектируемой системы представляется системой с последовательным соединением элементов, состоящей из 10 элементов  $A$ , 15 элементов  $B$ , 32 элементов  $D$  и 8 элементов  $F$ . Интенсивности отказов элементов известны и равны:

$$\lambda_A = 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}, \quad \lambda_B = 4 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}, \quad \lambda_D = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}, \quad \lambda_F = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Определить среднюю наработку до отказа  $T_{0c}$  и ВБР системы при наработках

$$t_1 = 100 \text{ ч}, t_2 = 1000 \text{ ч}.$$

$$\text{Ответ: } T_{0c} = 5 \cdot 10^3 \text{ ч}, P(t_1) = 0,98, P(t_2) = 0,819.$$

### 5.3. Расчёт надёжности системы с параллельным соединением элементов

Отказ системы произойдёт при отказе всех элементов (рис. 5.5).

$$Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot \dots \cdot Q_i(t) \cdot \dots \cdot Q_n(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t), \quad (5.8)$$

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)) \quad (5.9)$$

Например, при  $P_i(t) = 0,86$ ,  $n = 3$  получают  $P(t) = 1 - (1 - 0,86)^3 = 0,997$ .

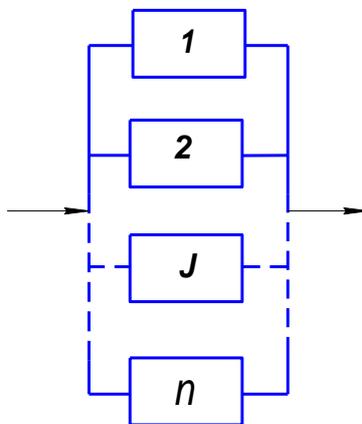


Рис. 5.5. Расчетная схема параллельного соединения элементов

При параллельном соединении можно сформировать надёжную конструкцию из самых ненадёжных элементов:

$$(P(t) + Q(t))^m = 1,$$

где  $m$  – количество элементов.

Например, при  $m = 2$ :  $(P(t) + Q(t))^m = P^2 + 2PQ + Q^2 = 1,$

здесь  $P^2$  означает вероятность безотказной работы обоих элементов;

$2PQ$  – вероятность отказа одного элемента, при этом второй элемент останется работоспособным;

$P^2 + 2PQ$  – из строя выйдет (откажет) не более одного элемента;

$Q^2$  – вероятность отказа обоих элементов;

$$P = Q = 0,5; 0,25 + 0,5 + 0,25 = 1;$$

при  $m = 3$ :  $(P(t) + Q(t))^m = P^3 + 3P^2Q + 3PQ^2 + Q^3 = 1,$

$P^3$  – все три элемента работоспособны;

$3P^2Q$  – из строя выйдет не более одного элемента;

$3QP^2$  – из строя выйдет не более двух элементов;

$Q^3$  – из строя выйдут все три элемента.

Из приведенного примера видно, что надёжность системы с параллельным соединением повышается при увеличении числа элементов.

При экспоненциальном распределении наработки выражение (5.9) принимает вид:

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n, \tag{5.10}$$

откуда после интегрирования и преобразований средняя наработка системы определяется:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}, \tag{5.11}$$

где  $T_{0i} = 1/\lambda$  – средняя наработка элемента.

При больших значениях  $n$  справедлива приближенная формула

$$T_0 = T_{0i} \left( \ln n + \frac{1}{2n} + 0,577 \right). \tag{5.12}$$

Таким образом, средняя наработка системы с параллельным соединением больше средней наработки её элементов (например, при  $n = 2$   $T_0 = 1,5T_{0i}$ , при  $n = 3$   $T_0 = 1,83T_{0i}$ ).

## Контрольные вопросы

1. Что такое система с последовательным соединением элементов, каковы условия её безотказной работы?
2. Что такое система с параллельным соединением элементов, каковы условия ее безотказной работы?
3. Как рассчитывается вероятность безотказной работы систем с параллельным соединением элементов?
4. Как можно повысить надёжность систем с параллельным соединением элементов?
5. Как определяются такие показатели безотказности системы с параллельным соединением элементов, как вероятность безотказной работы и средняя наработка системы?

### 5.4. Анализ сложных систем

Проблема эффективности технических систем является одной из основных. Она непосредственно связана с проблемами надёжности и экономичности.

Возрастание сложности технических систем приводит к снижению их надёжности, следовательно, к уменьшению их эффективности.

Недостаточная надёжность проектируемой или существующей технической системы может стать проблемой, для решения которой нужно выдвинуть альтернативные цели (например, отказ от производства системы или замена ее новой, более совершенной установкой; повышение надёжности существующей системы до требуемого уровня; улучшение условий эксплуатации существующей системы и т. д.).

На практике встречаются системы, для описания которых параллельное или последовательное соединение не годится. В качестве примера показана система, изображённая на рис. 5.6.

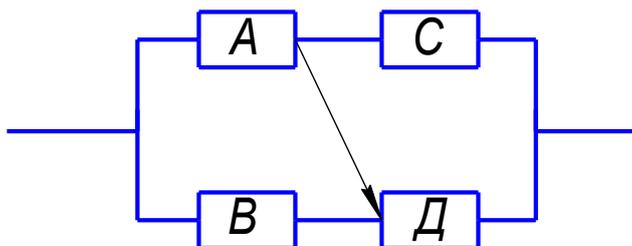


Рис. 5.6. Система со сложным соединением элементов

Примерами систем со сложным соединением элементов могут быть дорожная сеть, соединение энергетических систем и др.

В системе, изображённой на рис. 5.6, отказ элемента  $A$  нарушает сразу два пути  $AC$  и  $AD$ . Таким образом, это соединение не является параллельным. Последовательным такое соединение назвать также нельзя: в случае отказа элемента  $C$  система остаётся работоспособной.

Для определения вероятности безотказной работы системы или надёжности функционирования системы используют несколько методов. Рассмотрим самый простой – метод прямого перебора. С помощью этого метода можно определить надёжность работы любого типа технических систем, он легко поддаётся проверке, и, главное, он позволяет рассмотреть влияние отказов элементов на работу системы, т. е. на устойчивость функционирования системы. Недостатком данного метода является громоздкость и трудность в составлении универсальной программы для применения вычислительной техники.

Метод состоит в том, что рассматриваются все возможные способы появления отказов, т. е. не отказал ни один элемент, отказал один элемент, два и т. д.

При рассмотрении системы, изображённой на рис. 5.6, предполагается, что в данном случае элементы системы имеют следующие вероятности безотказной работы:

$$P(A) = 0,9; \quad P(B) = 0,8; \quad P(C) = 0,6; \quad P(D) = 0,7.$$

Событие  $A$  определяется как событие, состоящее в том, что элемент  $A$  работает безотказно, тогда  $\bar{A}$  – событие, состоящее в том, что элемент  $A$  отказал. Аналогично определяются события для всех остальных элементов. Затем вычисляется вероятность состояния системы для каждого способа появления отказа. Результаты всех вычислений записываются в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Таблица состояний**

№ состояния	Число отказавших элементов	События, характеризующие состояние системы	Вероятность состояния системы	Отметка о работоспособности системы, изображённой на рис. 5.6
1	0	$A \cap B \cap C \cap D$	0,3024	+
2	1	$\bar{A} \cap B \cap C \cap D$	0,0336	+
3	1	$A \cap B \cap \bar{C} \cap D$	0,0756	+
4	1	$A \cap B \cap C \cap \bar{D}$	0,1295	+
5	1	$A \cap \bar{B} \cap C \cap D$	0,2016	+
6	2	$A \cap \bar{B} \cap \bar{C} \cap D$	0,0084	–

№ состояния	Число отказавших элементов	События, характеризующие состояние системы	Вероятность состояния системы	Отметка о работоспособности системы, изображённой на рис. 5.6
7	2	$\bar{A} \cap B \cap C \cap \bar{D}$	0,0144	+
8	2	$A \cap B \cap C \cap \bar{D}$	0,0224	-
9	2	$A \cap B \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0324	+
10	2	$A \cap \bar{B} \cap C \cap \bar{D}$	0,0504	+
11	2	$A \cap B \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0864	-
12	3	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0036	-
13	3	$A \cap \bar{B} \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0096	-
14	3	$A \cap B \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0056	-
15	3	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap C \cap \bar{D}$	0,0216	-
16	4	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0024	-
		$\Sigma$	1,0000	0,8400

Первая строка табл. 5.1 заполняется следующим образом: вначале предполагается, что в системе не отказал ни один элемент,  $A \cap B \cap C \cap D$ , вероятность этого вычисляется по формуле

$$P^{(0)} = P(A)P(B)P(C)P(D) = 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,7 = 0,3024.$$

В графе «Отметка о работоспособности» ставится знак «+», если система работоспособна, и знак «-», если неработоспособна.

Вторая строка табл. 5.1 предполагает, что в системе отказал один элемент (элемент  $A$ ),  $\bar{A} \cap B \cap C \cap D$ , вероятность такого состояния системы:

$$P^{(1)} = P(\bar{A})P(B)P(C)P(D) = 0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,6 = 0,0336 \text{ при } P(A) = 1 - P(\bar{A}),$$

где  $P(\bar{A})$  и  $P(A)$  – вероятности отказа и безотказной работы элемента  $A$ .

Остальные строки табл. 5.1 заполняются аналогично с учетом отказа одного, двух, трёх и четырёх элементов системы.

Таким образом, система со сложным соединением элементов (подсистем) имеет вероятность безотказной работы 0,84.

Оценивая устойчивость функционирования технической системы, необходимо знать ее поведение в будущем. Если бы системы и объекты были безотказны, то большинство проблем, связанных с безопасностью, исчезло бы. Но все объекты, изделия и системы невечны, поэтому необходимо знать срок их безотказной работы, чтобы исключить аварии, вызванные отказами.

## Контрольные вопросы

1. Приведите пример системы со сложным соединением элементов.
2. С помощью какого метода анализируются системы со сложным соединением элементов?
3. Назовите преимущества и недостатки метода прямого перебора.

### 5.5. Расчёт структурной надёжности систем

Показатели надёжности ТС рассчитываются на основании предположения, что система и любой её элемент могут находиться только в одном из двух возможных состояний – работоспособном и неработоспособном, и отказы элементов независимы. Состояние системы (работоспособное или неработоспособное) определяется состоянием элементов и их сочетанием. Поэтому теоретически возможно свести расчет безотказности любой ТС к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы.

Такой метод (метод прямого перебора – см. п. 5.4) практически универсален и может использоваться при расчете любых ТС. Однако при большом количестве элементов системы  $n$  такой путь становится нереальным из-за большого объема вычислений (например, при  $n = 10$  число возможных состояний системы составляет  $2^n = 1024$ , при  $n = 20$  превышает  $10^6$ , при  $n = 30$  – более  $10^9$ ). Поэтому на практике используют более эффективные и экономичные методы расчета, не связанные с большим объемом вычислений. Возможность применения таких методов связана со структурой ТС.

#### 5.5.1. Системы типа « $m$ из $n$ »

Систему типа « $m$  из  $n$ » можно рассматривать как вариант системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из  $n$  элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее  $m$  элементов ( $m < n$ ).

Для расчёта надёжности систем типа « $m$  из  $n$ » при сравнительно небольшом количестве элементов можно воспользоваться методом прямого перебора.

Например, рассматривается система «2 из 5» (рис. 5.7), которая работоспособна, если из пяти её элементов работают любые два, три, четыре или все

пять (на схеме пунктиром обведены функционально необходимые два элемента, причем выделение элементов 1 и 2 произведено условно, в действительности все пять элементов равнозначны).

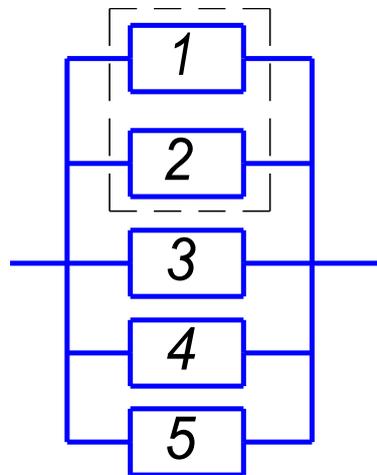


Рис. 5.7. Система «2 из 5»

Работоспособность такой системы определяется количеством работоспособных элементов. Все состояния системы «2 из 5» занесены в табл. 5.2 (в таблице работоспособные состояния элементов и системы отмечены знаком «+», неработоспособные – знаком «-»).

Вероятность любого состояния ТС определяется по теореме умножения вероятностей как произведение вероятностей состояний, в которых пребывают элементы.

С учётом всех возможных состояний вероятность безотказной работы системы может быть найдена по теореме сложения вероятностей всех работоспособных сочетаний. Удобнее вычислить вероятность отказа системы, так как количество неработоспособных состояний меньше, чем работоспособных. Для этого суммируются вероятности неработоспособных состояний.

$$\begin{aligned}
 Q &= P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} + P_{32} = 5pq^4 + q^5 = \\
 &= 5p(1-p)^4 + (1-p)^5 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5.
 \end{aligned}
 \tag{5.13}$$

Тогда вероятность безотказной работы системы

$$P = 1 - q = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5.
 \tag{5.14}$$

Расчёт надёжности системы « $m$  из  $n$ » может производиться комбинаторным методом при использовании биномиального распределения. Случайная величина называется биномиально распределенной с параметрами  $n$  и  $p$ , если возможные значения  $0, 1, \dots, n$  она принимает с вероятностями  $P(n, k)$ , задаваемыми формулой

$$P(n, k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (5.15)$$

где  $C_n^k$  – биномиальный коэффициент, называемый «числом сочетаний по  $k$  из  $n$ »:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (5.16)$$

Так как для отказа системы « $m$  из  $n$ » достаточно, чтобы количество работоспособных элементов было меньше  $m$ , вероятность отказа может быть найдена по теореме сложения вероятностей для  $k = 0, 1, \dots, (m-1)$ :

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} P_k = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (5.17)$$

Аналогичным образом можно вычислить вероятность безотказной работы как сумму (5.15) для  $k = m, m+1, \dots, n$ :

$$P = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (5.18)$$

Зная, что  $P + Q = 1$ , в расчётах следует выбирать ту из формул (5.17), (5.18), которая в данном случае содержит меньшее число слагаемых.

Для системы «2 из 5» (рис. 5.7) по формуле (5.18) получается:

$$P = C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = 10p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p) + p^5 = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \quad (5.19)$$

Вероятность отказа той же системы по (5.17) составит:

$$Q = C_5^0 (1-p)^5 + C_5^1 p(1-p)^4 + C_5^2 p^2(1-p)^3 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5. \quad (5.20)$$

Таблица состояний системы «2 из 5»

№ состояния	Состояние элементов					Состояние системы	Вероятность состояния системы
	1	2	3	4	5		
1	+	+	+	+	+	+	$p^5$
2	+	+	+	+	-	+	$p^4 q^1 = p^4(1-p)$
3	+	+	+	-	+	+	
4	+	+	-	+	+	+	
5	+	-	+	+	+	+	
6	-	+	+	+	+	+	
7	+	+	+	-	-	+	$p^3 q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	
9	+	-	+	+	-	+	
10	-	+	+	+	-	+	
11	+	+	-	-	+	+	
12	+	-	+	-	+	+	
13	-	+	+	-	+	+	
14	+	-	-	+	+	+	
15	-	+	-	+	+	+	
16	-	-	+	+	+	+	
17	+	+	-	-	-	+	$p^2 q^3 = p^2(1-p)^3$
18	+	-	+	-	-	+	
19	-	+	+	-	-	+	
20	+	-	-	-	+	+	
21	-	+	-	-	+	+	
22	-	-	-	+	+	+	
23	+	-	-	+	-	+	
24	-	+	-	+	-	+	
25	-	-	+	-	+	+	
26	-	-	+	+	-	+	
27	+	-	-	-	-	-	$p^1 q^4 = p^1(1-p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	
29	-	-	+	-	-	-	
30	-	-	-	+	-	-	
31	-	-	-	-	+	-	
32	-	-	-	-	-	-	$q^5 = (1-p)^5$

В табл. 5.3 приведены формулы для расчёта вероятности безотказной работы систем типа « $m$  из  $n$ » при  $m \leq n \leq 5$ .

### Формулы для расчета системы типа « $m$ из $n$ » при $m \leq n \leq 5$

ОБЩЕЕ ЧИСЛО ЭЛЕМЕНТОВ, $N$					
$m$	1	2	3	4	5
1	$p$	$2p - p^2$	$3p - 3p^2 + p^3$	$4p - 6p^2 + 4p^3 - p^4$	$5p - 10p^2 + 10p^3 - 5p^4 + p^5$
2	–	$p^2$	$3p^2 - 2p^3$	$6p^2 - 8p^3 + 3p^4$	$10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5$
3	–	–	$p^3$	$4p^3 - 3p^4$	$10p^3 - 15p^4 + 6p^5$
4	–	–	–	$p^4$	$5p^4 - 4p^5$
5	–	–	–	–	$p^5$

#### 5.5.2. Мостиковые схемы

*Мостиковой структурой* называется параллельное соединение последовательных цепочек элементов с диагональными элементами, включенными между узлами различных параллельных ветвей (рис. 5.8, а, б). Работоспособность такой системы зависит не только от количества отказавших элементов, но и от их положения в структурной схеме. При одновременном отказе элементов 1 и 4, или 2 и 5, или 2, 3 и 4 и т. д. схема (рис. 5.8) окажется неработоспособной. Но отказ элементов 1 и 5, или 2 и 4, или 1, 3 и 4, или 2, 3 и 5 к отказу системы не приводит.

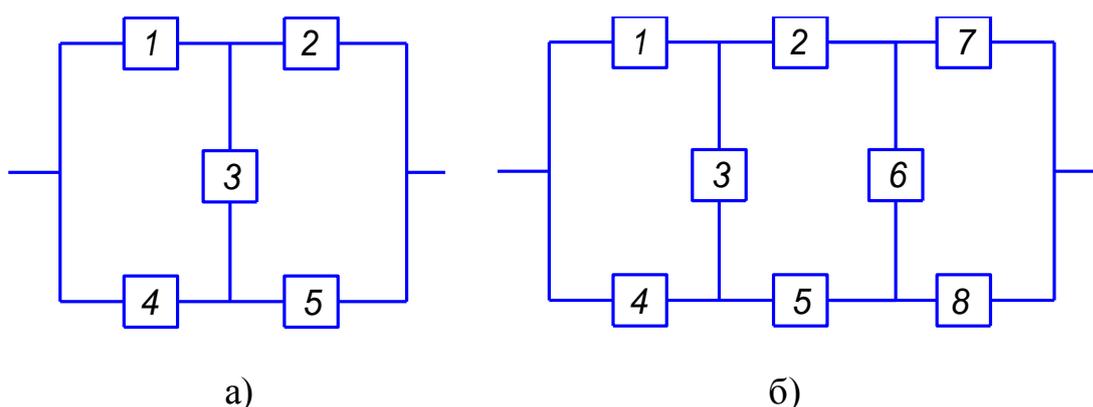


Рис. 5.8. Мостиковые схемы

Для расчёта надёжности мостиковых систем можно воспользоваться *методом прямого перебора*, как для систем « $m$  из  $n$ » (п. 5.5.1), но при анализе работоспособности каждого состояния системы необходимо учитывать не только число отказавших элементов, но и их положение в схеме (табл. 5.3). Вероят-

$$\begin{aligned}
P = & p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + \\
& + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + \\
& + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5 + \\
& + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + \\
& + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + \\
& + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5 + \\
& + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + \\
& + q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + \\
& + q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + \\
& + q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5.
\end{aligned}
\tag{5.21}$$

Для элементов с равной надёжностью

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.
\tag{5.22}$$

Метод прямого перебора эффективен только при малом количестве элементов  $n$ , поскольку число состояний системы составляет  $2^n$ . Например, для схемы на рис. 5.8, б их количество составит уже  $2^8 = 256$ . Если рассматривать только сочетания, отвечающие работоспособному (или неработоспособному) состоянию системы в целом, то это упростит расчёт.

При расчете мостиковых систем используется также метод логических схем с применением алгебры логики (булевой алгебры). Суть этого метода в составлении для ТС формулы алгебры логики, определяющей условие работоспособности системы. Для каждого элемента и системы в целом рассматриваются два противоположных события – отказ и сохранение работоспособности.

Таблица 5.4

**Таблица состояний мостиковой системы**

№ сост.	Состояние элементов					Состояние системы	Вероятность состояния	
	1	2	3	4	5		в общем случае	при равнонадежных элементах
1	+	+	+	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	$p^5$
2	+	+	+	+	-	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	$p^4 q = p^4 (1 - p)$
3	+	+	+	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
4	+	+	-	+	+	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
5	+	-	+	+	+	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
6	-	+	+	+	+	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	

№ сост.	Состояние элементов					Состояние системы	Вероятность состояния	
	1	2	3	4	5		в общем случае	при равнонадежных элементах
7	+	+	+	-	-	-	$P_1P_2P_3Q_4Q_5$	$p^3q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	$P_1P_2Q_3P_4Q_5$	
9	+	-	+	+	-	+	$P_1Q_2P_3P_4Q_5$	
10	-	+	+	+	-	+	$Q_1P_2P_3P_4Q_5$	
11	+	+	-	-	+	+	$P_1P_2Q_3Q_4P_5$	
12	+	-	+	-	+	+	$P_1Q_2P_3Q_4P_5$	
13	-	+	+	-	+	+	$Q_1P_2P_3Q_4P_5$	
14	+	-	-	+	+	+	$P_1Q_2Q_3P_4P_5$	
15	-	+	-	+	+	+	$Q_1P_2Q_3P_4P_5$	
16	-	-	+	+	+	-	$Q_1Q_2P_3P_4P_5$	
17	+	+	-	-	-	-	$P_1P_2Q_3Q_4Q_5$	$p^2q^3 = p^2(1-p)^3$
18	+	-	+	-	-	-	$P_1Q_2P_3Q_4Q_5$	
19	-	+	+	-	-	-	$Q_1P_2P_3Q_4Q_5$	
20	+	-	-	-	+	-	$P_1Q_2Q_3Q_4P_5$	
21	-	+	-	-	+	+	$Q_1P_2Q_3Q_4P_5$	
22	-	-	-	+	+	-	$Q_1Q_2Q_3P_4P_5$	
23	+	-	-	+	-	+	$P_1Q_2Q_3P_4P_5$	
24	-	+	-	+	-	-	$Q_1P_2Q_3P_4Q_5$	
25	-	-	+	-	+	-	$Q_1Q_2P_3Q_4P_5$	
26	-	-	+	+	-	-	$Q_1Q_2P_3P_4Q_5$	
27	+	-	-	-	-	-	$P_1Q_2Q_3Q_4Q_5$	$p q^4 = p(1-p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	$Q_1P_2Q_3Q_4Q_5$	
29	-	-	+	-	-	-	$Q_1Q_2P_3Q_4Q_5$	
30	-	-	-	+	-	-	$Q_1Q_2Q_3P_4Q_5$	
31	-	-	-	-	+	-	$Q_1Q_2Q_3Q_4P_5$	
32	-	-	-	-	-	-	$Q_1Q_2Q_3Q_4Q_5$	$q^5 = (1-p)^5$

Для составления логической схемы можно воспользоваться *методами минимальных путей и минимальных сечений*.

*Метод минимальных путей* дает точное значение только для сравнительно простых систем с небольшим числом элементов. Для более сложных систем результат расчета является нижней границей вероятности безотказной работы.

Метод минимальных сечений применяется для расчёта верхней границы вероятности безотказной работы системы.

Метод минимальных путей для расчета вероятности безотказной работы рассматривается на примере простейшей мостиковой схемы (рис. 5.8, а).

Минимальным путем называется последовательный набор работоспособных элементов системы, который обеспечивает её работоспособность, а отказ любого из них приводит к её отказу.

Минимальных путей в системе может быть несколько или один. Система с последовательным соединением элементов (рис. 5.1) имеет только один минимальный путь, включающий все элементы. В системе с параллельным соединением (рис. 5.2) число минимальных путей совпадает с числом элементов и каждый путь включает один из них.

Для мостиковой системы из пяти элементов (рис. 5.8, а) минимальных путей четыре: (элементы 1 и 4), (2 и 5), (1, 3 и 5), (2, 3 и 5). Логическая схема такой системы (рис. 5.9) составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального пути были соединены друг с другом последовательно, а все минимальные пути – параллельно.

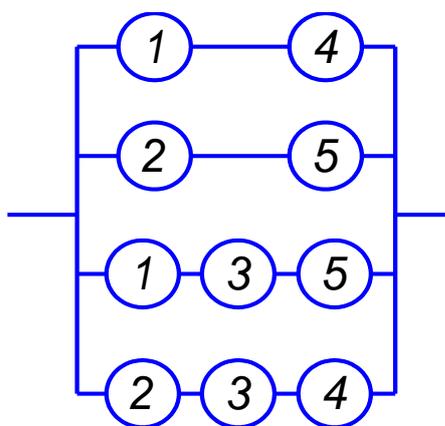


Рис. 5.9. Логическая схема мостиковой системы по методу минимальных путей

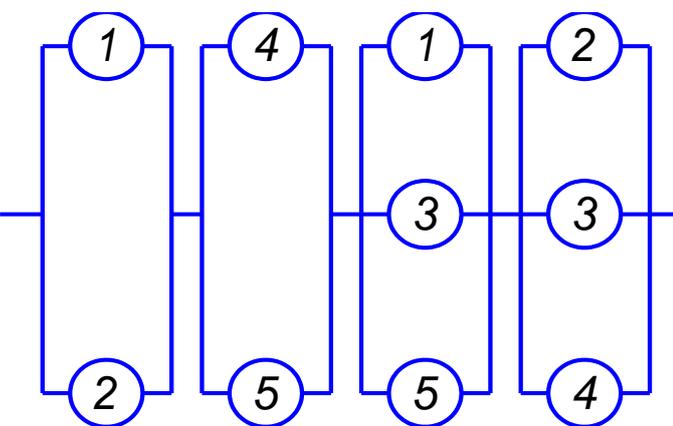


Рис. 5.10. Логическая схема мостиковой системы по методу минимальных сечений

Затем для логической схемы составляется функция алгебры логики по общим правилам расчета вероятности безотказной работы, но вместо символов вероятностей безотказной работы элементов  $P_i$  и системы  $P$  используются символы события (сохранения работоспособности элемента  $a_i$  и системы  $A$ ). Так, «отказ» логической схемы рис. 5.9 состоит в одновременном отказе всех четырех параллельных ветвей, а «безотказная работа» каждой ветви – в одно-

временной безотказной работе ее элементов. Последовательное соединение элементов логической схемы соответствует логическому умножению («И»), параллельное – логическому сложению («ИЛИ»). Следовательно, схема на рис. 5.9 соответствует утверждению: система работоспособна, если работоспособны элементы 1 и 4, или 2 и 5, или 1, 3 и 5, или 2, 3 и 4. Функция алгебры логики запишется:

$$A = 1 - (1 - a_1 a_4)(1 - a_2 a_5)(1 - a_1 a_3 a_5)(1 - a_2 a_3 a_4). \quad (5.23)$$

В выражении (5.23) переменные  $a$  рассматриваются как булевы, т. е. могут принимать только два значения: 0 или 1. Тогда при возведении в любую степень  $k$  любая переменная  $a$  сохраняет свое значение:  $a_i^k = a_i$ . На основе этого свойства формула, описывающая функцию алгебры логики (5.23), может быть преобразована к виду

$$A = a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_5 - 2a_1 a_2 a_4 a_5 - a_2 a_3 a_4 a_5 + 2a_1 a_2 a_3 a_4 a_5. \quad (5.24)$$

Заменив в выражении (5.24) символы событий  $a_i$  их вероятностями  $P_i$ , получим уравнение для определения вероятности безотказной работы системы

$$P = P_1 P_4 + P_2 P_5 + P_1 P_3 P_5 + P_2 P_3 P_4 - P_1 P_2 P_3 P_4 - P_1 P_2 P_3 P_5 - 2P_1 P_2 P_4 P_5 - P_2 P_3 P_4 P_5 + 2P_1 P_2 P_3 P_4 P_5. \quad (5.25)$$

Для системы равнонадёжных элементов ( $P_i = P$ ) выражение (5.25) легко преобразуется в формулу (5.22).

*Минимальным сечением* называется набор неработоспособных элементов, отказ которых приводит к отказу системы, а восстановление работоспособности любого из них – к восстановлению работоспособности системы. Как минимальных путей, так и минимальных сечений может быть несколько. Очевидно, система с параллельным соединением элементов имеет только одно минимальное сечение, включающее все её элементы (восстановление любого восстановит работоспособность системы). В системе с последовательным соединением элементов число минимальных путей совпадает с числом элементов и каждое сечение включает один из них.

В мостиковой системе (рис. 5.8, а) минимальных сечений четыре (элементы 1 и 2), (4 и 5), (1, 3 и 5), (2, 3 и 4). Логическая схема системы (рис. 5.9) составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального сечения

были соединены друг с другом параллельно, а все минимальные сечения – последовательно. Аналогично методу минимальных путей составляется функция алгебры логики.

Безотказная работа логической системы (рис. 5.10) заключается в безотказной работе всех последовательных участков, а отказ каждого из них – в одновременном отказе всех параллельно включенных элементов. Так как схема метода минимальных сечений формулирует условия отказа системы, в ней последовательное соединение соответствует логическому «ИЛИ», а параллельное – логическому «И». Схема рис. 5.10 соответствует формулировке: система откажет, если откажут элементы 1 и 2, или 4 и 5, или 1, 3 и 5, или 2, 3 и 4. Функция алгебры логики записывается

$$A = [1 - (1 - a_1)(1 - a_2)] \cdot [1 - (1 - a_4)(1 - a_5)] \times \\ \times [1 - (1 - a_1)(1 - a_3)(1 - a_5)] \cdot [1 - (1 - a_2)(1 - a_3)(1 - a_4)]. \quad (5.26)$$

После преобразований с использованием свойств булевых переменных выражение (5.26) приобретает форму (5.24), а после замены событий их вероятностями переходит в выражение (5.25).

Таким образом, для мостиковой системы из пяти элементов верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы, полученные методами минимальных сечений и минимальных путей, совпали с точными значениями (5.22), полученными методом прямого перебора. Для сложных систем это может не произойти, поэтому методы минимальных путей и минимальных сечений следует применять совместно.

При анализе надежности ТС можно воспользоваться *методом разложения относительно особого элемента*, основанным на известной в математической логике теореме о разложении функции логики по любому аргументу.

Согласно этой теореме, можно записать:

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0), \quad (5.27)$$

где  $p_i$  и  $q_i = 1 - p_i$  – вероятности безотказной работы и отказа  $i$ -го элемента;  $P(p_i = 1)$  и  $P(p_i = 0)$  – вероятности работоспособного состояния системы при условии, что  $i$ -й элемент абсолютно надежен и что  $i$ -й элемент отказал.

Для мостиковой схемы (рис. 5.8, а) в качестве особого целесообразно выбрать диагональный элемент 3. При  $p_3 = 1$  мостиковая схема превращается в параллельно-последовательное соединение (рис. 5.11, а), а при  $p_3 = 0$  – в последовательно-параллельное (рис. 5.11, б).

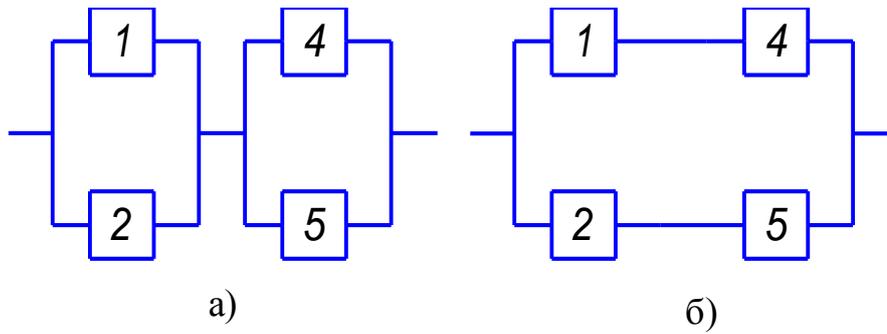


Рис. 5.11. Преобразование мостиковой схемы при абсолютно надежном (а) и отказавшем (б) центральном элементе

Для преобразованных схем можно записать:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_3)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)], \quad (5.28)$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5). \quad (5.29)$$

Тогда на основании формулы (5.27) получается:

$$P = p_3 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + (1 - p_3) [1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)]. \quad (5.30)$$

Легко убедиться, что для равнонадёжных элементов формула (5.30) обращается в формулу (5.22).

Этим методом можно воспользоваться и при разложении относительно нескольких «особых» элементов. Например, для двух элементов ( $i, j$ ) выражение (5.27) примет вид:

$$P = p_i p_j P(p_i = 1, p_j = 1) + p_i q_j P(p_i = 1, p_j = 0) + q_i p_j P(p_i = 0, p_j = 1) + q_i q_j P(p_i = 0, p_j = 0). \quad (5.31)$$

Для мостиковой схемы (рис. 5.8, б) вероятность безотказной работы при разложении относительно диагональных элементов 3 и 6 определяется выражением (5.31):

$$P = p_3 p_6 P(p_3 = 1, p_6 = 1) + p_3 q_6 P(p_3 = 1, p_6 = 0) + q_3 p_6 P(p_3 = 0, p_6 = 1) + q_3 q_6 P(p_3 = 0, p_6 = 0). \quad (5.32)$$

Выражения для определения вероятности  $P(p_3 p_6)$  можно составить, выполнив предварительно преобразованные схемы (например, рис. 5.11, а, б).

## Контрольные вопросы

1. Назовите принцип расчета систем типа « $m$  из  $n$ ».
2. Какими методами рассчитываются мостиковые системы?
3. В чем сущность метода логических схем?

### 5.5.3. Комбинированные системы

При анализе комбинированной системы нужно разбить систему на простые подсистемы – группы элементов, методика расчета надёжности которых известна. Затем эти подсистемы в структурной схеме надёжности заменяются элементами с вероятностями безотказной работы, равными вычисленным вероятностям безотказной работы этих подсистем. Такие действия нужно выполнять до тех пор, пока оставшиеся элементы не образуют структуру, методика расчёта надёжности которой также известна.

В качестве примера рассматривается комбинированная система, представленная на рис. 5.12. Здесь элементы 5 и 7, 6 и 8 попарно образуют друг с другом последовательные соединения. Замена элементов 5 и 7, 6 и 8 соответственно элементами  $A$ ,  $B$  позволяет выполнить расчёт надёжности по формулам п. 5.2. Элементы 9, 10, 11 образуют параллельное соединение (п. 5.3), а элементы 12, 13, 14 – систему «2 из 3» (п. 5.5.1). При подобной замене соответствующие элементы обозначены  $C$  и  $D$ . В результате преобразованная схема принимает вид, показанный на рис. 5.13, а. В ней, в свою очередь, элементы 2, 3, 4,  $A$ ,  $B$  образуют мостиковую схему (п. 5.5.1), которая заменяется элементом  $E$ . Элементы  $C$ ,  $D$  и 15 образуют друг с другом последовательное соединение, обозначенное как элемент  $F$ . Схема, полученная после таких преобразований (рис. 5.13, б), показывает последовательное соединение элементов 1,  $E$ ,  $F$ , для которых справедлива формула последовательного соединения п. 5.2.

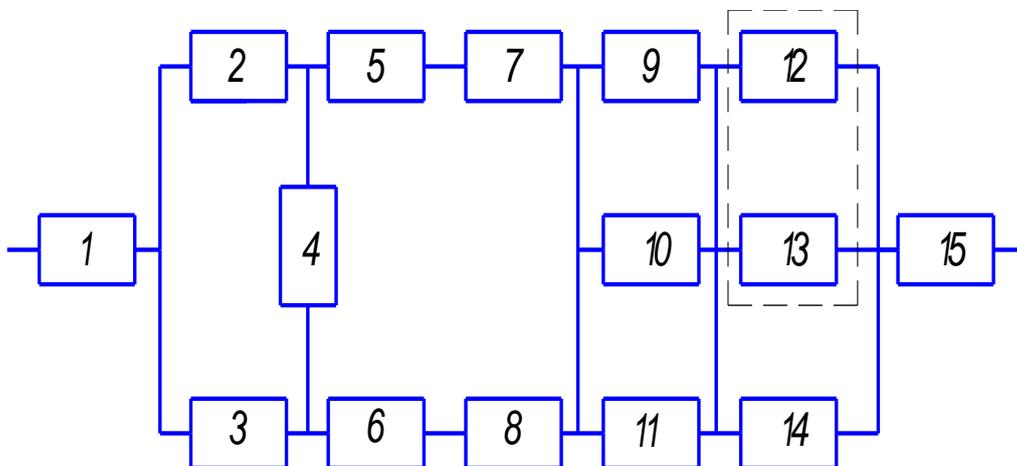


Рис. 5.12. Исходная система

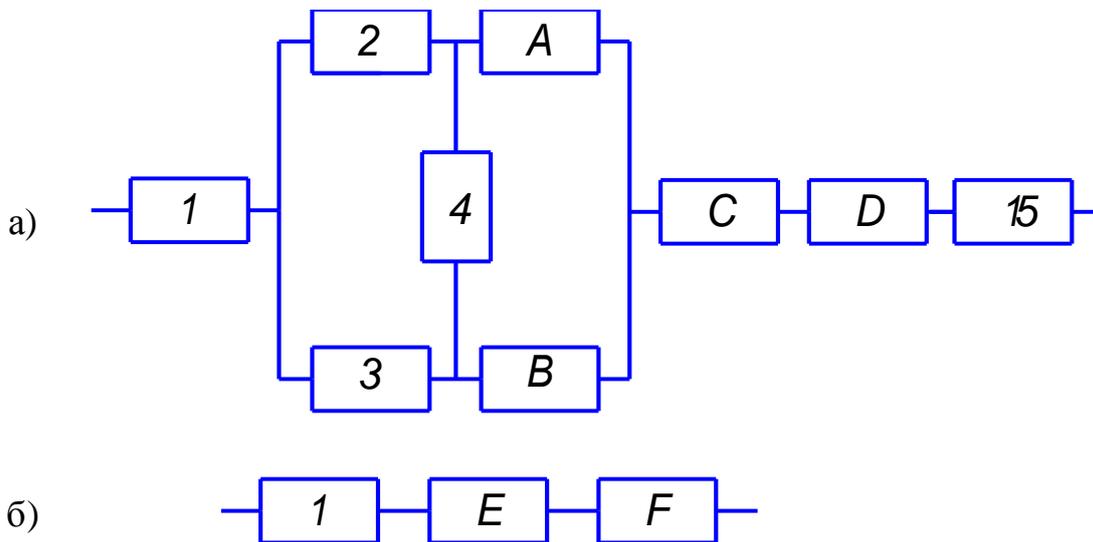


Рис. 5.13. Преобразованная система

**Пример 5.1.** Определить  $P_{сист}$ , если вероятности безотказной работы соответствующих элементов равны:

Элемент $i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$P_i$	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,8	0,7	0,7	0,6	0,4	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8

**Решение:**

1. Рассчитываются вероятности безотказной работы элементов  $A$  и  $B$  по формуле (5.1) последовательного соединения:

$$P_A = P_5 \cdot P_7 = 0,6 \cdot 0,7 = 0,42,$$

$$P_B = P_6 \cdot P_8 = 0,8 \cdot 0,7 = 0,56.$$

2. Рассчитывается вероятность безотказной работы элементов  $C$  по формулам (5.8), (5.9) параллельного соединения:

$$Q_C = Q_9 \cdot Q_{10} \cdot Q_{11} = (1 - P_9) \cdot (1 - P_{10}) \cdot (1 - P_{11}) = (1 - 0,6) \times \\ \times (1 - 0,4) \cdot (1 - 0,8) = 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,2 = 0,048,$$

$$P_C = 1 - Q_C = 1 - 0,048 = 0,952.$$

3. Для системы  $D$  – «2 из 3» вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле (5.15):

$$P_D = P_3^3 + 3P_3^2 \cdot (1 - p) = p^3 + 3p^2(1 - p) = \\ = 3p^2 - 2p^3 = 3 \cdot (0,9)^2 - 2 \cdot (0,9)^3 = 2,43 - 1,458 = 0,972.$$

$$\begin{aligned}
P_E &= p_2 p_3 p_4 p_A p_B + p_2 p_3 p_4 p_A q_B + p_2 p_3 p_4 q_A p_B + \\
&+ p_2 p_3 q_4 p_A p_B + p_2 q_3 p_4 p_A p_B + q_2 p_3 p_4 p_A p_B + \\
&+ p_2 p_3 q_4 p_A q_B + p_2 p_3 p_4 q_A q_B + q_2 p_3 p_4 p_A q_B + \\
&+ p_2 q_3 q_4 p_A p_B + p_2 q_3 p_4 q_A p_B + q_2 q_3 p_4 p_A p_B + \\
&+ p_2 p_3 q_4 q_A p_B + q_2 p_3 q_4 p_A p_B + q_2 p_3 q_4 q_A p_B + \\
&+ p_2 p_3 q_4 q_A q_B p_E = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,56 + 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,44 + \\
&+ 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,58 \cdot 0,56 + 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,56 + 0,8 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,56 + \\
&+ 0,2 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,56 + 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,44 + 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,58 \cdot 0,44 + \\
&+ 0,2 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,44 + 0,8 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,56 + 0,8 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,58 \cdot 0,56 + \\
&+ 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,56 + 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,58 \cdot 0,56 + 0,2 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,42 \cdot 0,56 + \\
&+ 0,2 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,58 \cdot 0,56 + 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,58 \cdot 0,44 = \\
&= 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot (0,2352 + 0,1848 \cdot 0,3248 + 0,2352 + 0,1848 + 0,2552 + 0,3248 + 0,2552) + \\
&+ 0,2352 \cdot (0,04 + 0,09 + 0,04 + 0,01 + 0,09) + 0,1848 \cdot 0,09 + 0,3248 \cdot (0,04 + 0,09) = \\
&= 0,36 \cdot 2 + 0,2352 \cdot 0,27 + 0,016632 + 0,042224 = 0,84236.
\end{aligned}$$

5. Рассчитывается элемент  $F$  по формуле (5.1):

$$P_F = P_C P_D P_E = 0,952 \cdot 0,972 \cdot 0,8 = 0,7402752$$

6. В преобразованной схеме (рис. 5.13, б) элементы 1,  $E$  и  $F$  составляют последовательное соединение. Тогда вероятность безотказной работы всей системы

$$P = P_1 P_E P_F = 0,7 \cdot 0,84236 \cdot 0,7402752 = 0,4365$$

7. Вывод: систему можно считать недостаточно надёжной, так как  $P = 0,4365$ . Чтобы повысить надёжность системы, необходимо применить резервирование, которое рассматривается в следующей главе.

## Контрольные вопросы

1. Что называется комбинированной системой? Приведите пример.
2. Назовите принцип расчёта комбинированных систем.

## 6. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 6.1. Резервирование

Существенное снижение риска, достигаемое в результате повышения общей безопасности, возможно при комплексном подходе с учетом всех трех основных форм надежности системы: проектной надежности (закладываемой в проекте); производственной; операционной (эксплуатационной).

Известны три основных пути повышения надежности:

- а) повышение надежности отдельных элементов системы;
- б) введение избыточности с целью повышения надежности;
- в) коренное изменение структуры и принципов функционирования отдельных элементов и системы в целом.

Для достижения высокой надежности работы технических систем конструктивные, технологические и эксплуатационные мероприятия могут оказаться недостаточными, тогда применяется резервирование. Особенно это относится к системам, для которых повышением надежности элементов не удается достичь требуемой безотказности системы.

Повышение надежности элементов на первый взгляд представляется наиболее простым приемом повышения надежности системы. Действительно, теоретически всегда можно указать такие характеристики надежности элементов, при которых вероятность безотказной работы системы удовлетворяла бы заданным требованиям. Однако практическая реализация такой высокой надежности элементов не всегда возможна. Рассмотрение методов обеспечения надежности элементов ТС является предметом специальных технологических и физико-химических дисциплин и выходит за рамки теории надежности. Однако высоконадежные элементы, как правило, имеют большие габариты, массу и стоимость.

Изменение *структуры* системы с целью повышения надежности подразумевает два аспекта.

Во-первых, это означает перестройку конструктивной или функциональной схемы ТС (структуры связей между составными элементами), изменение принципов функционирования отдельных частей системы (например, переход от аналоговой обработки сигналов к цифровой). Такого рода преобразования ТС возможны исключительно редко, так что этот прием, в общем, не решает проблемы надежности.

Во-вторых, изменение структуры понимается как введение в ТС *избыточных* элементов, включающихся в работу при отказе основных. Применение дополнительных средств и возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов называется *резервированием*.

Термин *резервирование*, введенный ГОСТ 27.002–89 [7], означает применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов. Резервирование осуществляет принцип избыточности.

*Избыточность* по ГОСТ 27.002–89 [7] – дополнительные средства и (или) возможности, приданные объекту сверх наименьшего числа необходимых для выполнения объектом заданных функций. Осуществление избыточности обеспечивает нормальное функционирование объекта после возникновения отказов его элементов.

Работоспособность систем без резервирования требует высокой надежности всех элементов системы. В сложных технических устройствах без резервирования никогда не удается достичь высокой надежности, даже если использовать элементы с высокими показателями безотказности.

Система с *резервированием* – это система с *избыточностью* элементов, т. е. с резервными составляющими, избыточными по отношению к минимально необходимой (основной) структуре и выполняющими те же функции, что и основные элементы.

Принцип резервирования подобен рассмотренному ранее параллельному соединению элементов (п. 5.3) и соединению типа «*n* из *n*» (п. 5.5.1), где за счет избыточности возможно обеспечение более высокой надежности системы, чем ее элементов.

В системах с резервированием работоспособность обеспечивается до тех пор, пока для замены отказавших основных элементов имеются в наличии резервные.

Различают следующие методы резервирования:

*по виду резервирования*: структурное, временное, информационное, функциональное, нагрузочное;

*по способу соединения элементов системы*: общее, отдельное, смешанное;

*по способу включения резервных элементов*: постоянное, динамическое, в том числе резервирование замещением, скользящее, мажоритарное;

*по кратности резервирования*: с целой кратностью, с дробной кратностью;  
*по режиму работы резерва*: нагруженный, облегченный, ненагруженный;  
*по возможности восстановления*: с восстановлением, без восстановления.

При *структурном* резервировании в объект с наименьшим достаточным для выполнения требуемых функций количеством элементов вводятся дополнительные элементы. *Основным* считается элемент, необходимый для выполнения требуемых функций объектом без отказов.

*Резервный* элемент функционально заменяет основной в случае отказа последнего. В ряде условий и режимов работы основной элемент может быть резервным.

*Резервируемый* элемент – основной, для которого предназначается *резервный* элемент.

*Временное* резервирование подразумевает использование запасов времени. Согласно начальным условиям, для выполнения заданных функций объекту отводится заведомо больше времени, чем необходимо. Резервы времени создаются, например, за счет интенсификации работы объекта.

*Информационное* резервирование обеспечивается избытком информации.

В каналах связи для этого одно и то же сообщение передается многократно, используются избыточные символы для отображения передаваемой информации и т. д. с целью уменьшения или устранения искажений.

*Функциональное* резервирование осуществляется при выполнении заданных функций разными способами и техническими средствами (например, одновременное использование различных средств связи в системах управления). Оценку надежности в таких случаях ведут не по *наработке на отказ*, а по *коэффициенту готовности* и др.

*Нагрузочное* резервирование – применение нагрузочных резервов с целью обеспечения оптимальной нагрузочной способности элементов.

Если резервирование применено к системе в целом, то оно называется *общим*, если к одному или нескольким элементам – *раздельным*.

*Смешанное* резервирование осуществляется при сочетании нескольких видов резервирования в одном объекте.

*Постоянное* резервирование производится без изменения структуры объекта при возникновении отказа его элемента; при этом не требуется дополнительных переключающих устройств и не требуется время на переключение.

Динамическое резервирование выполняется посредством изменения структуры объекта и, в свою очередь, подразделяется на несколько разновидностей:

– резервирование *замещением*, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного;

– *скользящее* резервирование, при котором несколько основных элементов резервируются одним или несколькими резервными, каждый из которых может заменить любой основной;

– *мажоритарное* резервирование, при котором используется «голосование», т. е. дополнительный (мажоритарный) логический элемент сравнивает сигналы, поступающие от элементов с одинаковыми функциями. При совпадении результатов сигналы передаются на выход.

Важной характеристикой структурного резервирования является *кратность* резервирования – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов, выраженное несокращаемой дробью (типа 2 : 3; 4 : 2 и т. д.).

Схемные обозначения различных способов резервирования показаны на рис. 6.1.

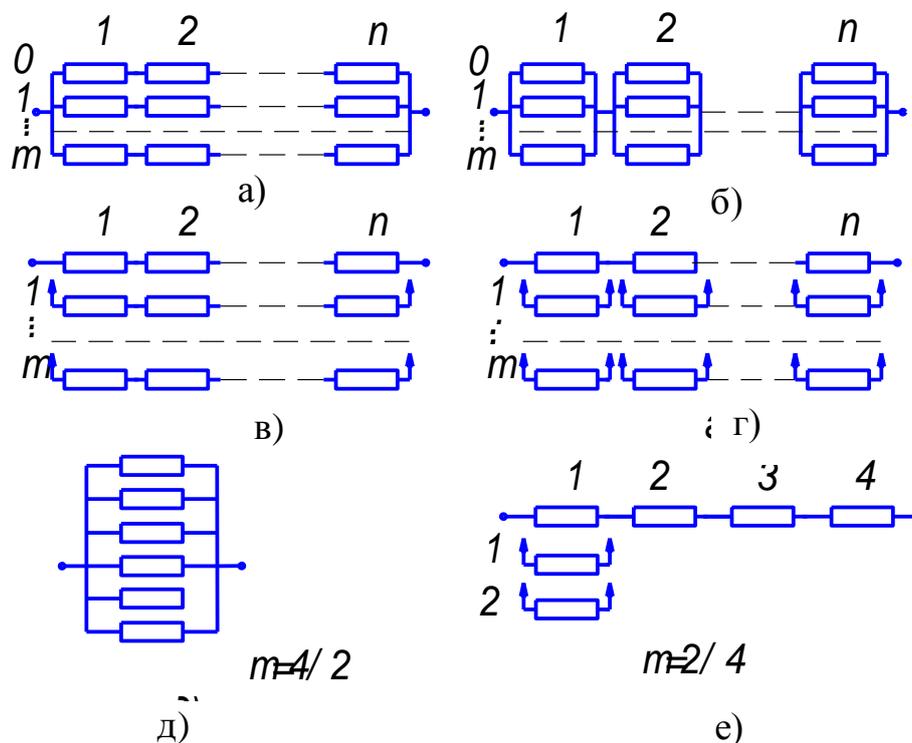


Рис. 6.1. Схемные обозначения различных способов резервирования:

а – общее постоянное с целой кратностью; б – раздельное постоянное с целой кратностью;

в – общее замещением с целой кратностью; г – раздельное замещением с целой кратностью; д – общее постоянное с дробной кратностью;

е – раздельное замещением с дробной кратностью

*Резервирование с целой кратностью* выполняется при резервировании одного основного элемента одним или несколькими резервными элементами.

*Резервирование с дробной кратностью* – при резервировании двух (или более) однотипных элементов одним (или более) резервным элементом.

Резервирование одного основного элемента одним резервным (т. е. с кратностью 1 : 1) называется *дублированием*.

По состоянию (режиму работы) резерва выделяются:

– *нагруженное* резервирование, при котором резервные элементы (или один из них) находятся в режиме основного элемента;

– *облегченное* резервирование, действительное в случаях, когда резервные элементы (по крайней мере один из них) находятся в менее нагруженном режиме по сравнению с основными;

– *ненагруженное* резервирование, при котором резервные элементы до начала выполнения ими функций находятся в ненагруженном режиме.

Наконец, если работоспособность резервных элементов восстанавливается при эксплуатации, то применяется резервирование *с восстановлением*, в остальных случаях используется резервирование *без восстановления*.

## **6.2. Кратность резервирования и основные расчетные формулы**

*Кратность резервирования* является основным параметром резервирования, определяемым как  $m/n$  – отношение числа резервных цепей к числу основных (резервируемых).

Как указано ранее (п. 6.1), различают резервирование с целой и дробной кратностью. При резервировании с целой кратностью величина  $m$  рассматривается как целое число; при резервировании с дробной кратностью величина  $m$  представляется в виде несокращаемой дроби. Например,  $m = 4/2$  означает, что имеется резервирование с дробной кратностью, при котором число резервных элементов равно четырем, число основных – двум, а общее их число равно шести. Дробь не сокращается, так как если  $m = 4/2 = 2$ , то это означает наличие резервирования с целой кратностью, равной двум, при общем числе элементов, равном трем.

Резервирование по способу включения может быть *постоянным* или *резервированием замещением*.

При *постоянном* резервировании резервные элементы подключены к основным в течение всего времени работы и работают в одинаковом с ними режиме.

При *резервировании замещением* резервные элементы замещают основные после их отказа.

Включение резерва по способу замещения свидетельствует о том, что резервные элементы до момента включения их в работу могут находиться в трех состояниях:

- нагруженном резерве;
- облегченном резерве;
- ненагруженном резерве.

Для известных методов резервирования используются следующие расчётные формулы.

1. Для *общего резервирования с постоянно включенным (нагруженным) резервом и с целой кратностью* (рис. 6.1<sub>а</sub>):

$$P_c(t) = 1 - \left[ 1 - \prod_{i=1}^m p_i(t) \right]^{m+1}, \quad (6.1)$$

где  $p_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента в течение времени  $t$ ;

$n$  – число элементов основной или любой резервной цепи.

*Кратность резервирования  $m/n$*  – отношение числа резервных цепей к числу основных (резервируемых). Дробь не сокращается.

При экспоненциальном законе надежности, когда

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$$

$$P_c(t) = 1 - \left[ 1 - e^{-\lambda_c t} \right]^{m+1}, \quad (6.2)$$

$$T_{cp.c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_{cp.0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1},$$

где  $\lambda_0 = \sum_{i=1}^m \lambda_i$  – интенсивность отказов нерезервированной системы или любой

из  $m$  резервных систем;  $T_{cp.0}$  – среднее время безотказной работы нерезервированной системы или любой из  $m$  резервных систем.

При резервировании неравнонадежных изделий

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^n q_i(t) = 1 - \prod_{i=0}^n [1 - p_i(t)] \quad (6.3)$$

где  $q_i(t)$ ,  $p_i(t)$  – вероятность отказов и вероятность безотказной работы в течение времени  $t$   $i$ -го изделия соответственно.

2. Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом и с целой кратностью (рис. 6.1, б):

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - [1 - p_i(t)]^{m_i + 1} \right\} \quad (6.4)$$

где  $p_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента;

$m_i$  – кратность резервирования  $i$ -го элемента;

$n$  – число элементов основной системы.

При экспоненциальном законе надежности, когда  $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ ,

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - [1 - e^{-\lambda_i t}]^{m_i + 1} \right\} \quad (6.5)$$

При равнонадежных элементах и одинаковой кратности их резервирования

$$P_c(t) = \left\{ 1 - [1 - e^{-\lambda t}]^{m+1} \right\} \quad (6.6)$$

$$T_{cp.c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{i=0}^m \frac{1}{v_i(v_i+1)\dots(v_i+n-1)} \quad (6.7)$$

где  $v_i = (i+1) / (m+1)$ .

3. Общее резервирование замещением с целой кратностью (рис. 6.1, в):

$$P_{m+1}(t) = P_m(t) + \int_0^t P(t-\tau) a_m(\tau) d\tau \quad (6.8)$$

где  $P_{m+1}(t)$ ,  $P_m(t)$  – вероятности безотказной работы резервированной системы кратности  $m+1$  и  $m$  соответственно;  $P(t-\tau)$  – вероятность безотказной работы основной системы в течение времени  $(t-\tau)$ ;  $a_m(\tau)$  – частота отказов резервированной системы кратности  $m$  в момент времени  $\tau$ .

Формула (6.8) позволяет получить расчетные соотношения для устройств любой кратности резервирования. Для получения таких формул необходимо

выполнить интегрирование в правой части, подставив вместо  $P(t - \tau)$  и  $a_m(\tau)$  их значения в соответствии с выбранным законом распределения и состоянием резерва.

При экспоненциальном законе надежности и ненагруженном состоянии резерва

$$P_a(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}, \quad (6.9)$$

$$T_{cp.c} = T_{cp.0}(m+1), \quad (6.10)$$

где  $\lambda_0$ ,  $T_{cp.0}$  — интенсивность отказов и средняя наработка до первого отказа основного (нерезервированного) устройства.

При экспоненциальном законе и ненагруженном состоянии резерва

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[ 1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^i \right], \quad (6.11)$$

$$T_{cp.c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1 + ik}, \quad (6.12)$$

где  $a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left( j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)$ ;  $k = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}$ ;  $\lambda_1$  — интенсивность отказов резервного устройства до замещения.

При нагруженном состоянии резерва формулы для  $P_c(t)$  и  $T_{cp.c}$  совпадают с (6.2).

4. *Раздельное резервирование замещением с целой кратностью* (рис. 6.1, г):

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (6.13)$$

где  $p_i(t)$  — вероятность безотказной работы системы из-за отказов элементов  $i$ -го типа, резервированных по способу замещения. Вычисляется  $p_i(t)$  по формулам общего резервирования замещением (формулы (6.8), (6.9), (6.11)).

5. *Общее резервирование с дробной кратностью и постоянно включенным резервом* (рис. 6.1, д):

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_i^l P^{l-i}(t) \sum_{j=0}^i (-1)^j C_1^j P_0^j(t), \quad (6.14)$$

$$T_{cp.c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{l-h} \frac{1}{h+i}, \quad (6.15)$$

где  $p_0(t)$  – вероятность безотказной работы основного или любого резервного элемента;

$l$  – общее число основных и резервных систем;

$h$  – число систем, необходимых для нормальной работы резервированной системы.

В данном случае кратность резервирования

$$m = (l - h)/h. \quad (6.16)$$

6. Скользящее резервирование:

$$P_c(t) = p^n(t) + n p^{n-1}(t) \int_0^t a(\tau) p(t-\tau) d\tau + \\ + n^2 p^{n-1}(t) \int_0^t a(\tau) \left\{ \int_0^{t-\tau} a(\tau_1) p(t-\tau^I) d\tau_1 \right\} d\tau + \dots + n^{m_0} p^{n-1}(t) \int_0^t a(\tau) \times \\ \times \left\{ \int_0^{t-\tau} a(\tau_1) \left\{ \int_0^{t-\tau^I} a(\tau_2) \dots \left\{ \int_0^{t-\tau^{(m_0-2)}} a(\tau_{m_0-1}) p(t-\tau^{m_0-1}) d\tau_{m_0-1} \right\} \dots \right\} d\tau_1 \right\} d\tau, \quad (6.17)$$

где  $\tau^I = \tau + \tau_1$ ;  $\tau^{II} = \tau + \tau_1 + \tau_2 \dots$ ;  $\tau^{m_0-1} = \tau + \tau_1 + \dots + \tau_{m_0-1}$ ;  $n$  – число элементов основной системы;  $m_0$  – число резервных элементов;  $p(t - t_i)$  – вероятность безотказной работы одного элемента в течение времени  $(t - t_i)$ ;

$t_i = t - \tau$ ,  $t - \tau$ ,  $t - \tau^{m_0-1}$ ;  $a(\tau_i)$  – частота отказов одного из основных элементов в момент времени  $\tau_i$ ,  $\tau_i = \tau, \tau_1, \dots, \tau_{m_0-1}$ .

При экспоненциальном законе надежности

$$P_c = e^{-n\lambda t} \left[ 1 + n\lambda t + \frac{(n\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(n\lambda t)^{m_0}}{m_0!} \right] = \\ = e^{-n\lambda t} \sum_{i=1}^{m_0} \frac{(n\lambda t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{m_0} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}; \quad (6.18)$$

$$T_{cp.c} = T_{cp.0}(m_0 + 1),$$

где  $\lambda_0 = n\lambda$  – интенсивность отказов нерезервированной системы;  $\lambda$  – интенсивность отказов элемента;  $n$  – число элементов основной системы;  $T_{cp.0}$  – среднее

время безотказной работы нерезервированной системы;  $m_0$  – число резервных элементов. В этом случае кратность резервирования

$$m = m_0/n. \quad (6.19)$$

Приведенные выше формулы (кроме (6.8), (6.11), (6.12)) могут быть использованы только в тех случаях, когда справедливо допущение об отсутствии последствий отказов.

Последствия отказов проявляются практически всегда при постоянном включении резерва, а также в случае резервирования замещением при недогруженном состоянии резерва.

Выражение (6.8) является основным при получении расчетных формул в случае учета влияния последствия отказов. При этом члены  $p(t - \tau)$  и  $a_m(\tau)$  должны быть записаны с учетом последствий отказов, вида резервирования и его кратности.

Элементы резервированных устройств в ряде случаев могут иметь два вида отказов – «обрыв» и «короткое замыкание». В этом случае вычислять вероятность безотказной работы следует, суммируя вероятности всех благоприятных (не приводящих к отказу) гипотез  $k$  т. е.

$$P_c(t) = \sum_{j=1}^k p_j(t), \quad (6.20)$$

где  $p_j(t)$  – вероятность  $j$ -й благоприятной гипотезы, вычисленной с учетом двух видов отказов;  $k$  – число благоприятных гипотез.

При вычислениях  $p_j(t)$  следует иметь в виду, что для элементов сложной системы справедливы выражения

$$p(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right], \quad \varphi_0 + \varphi_3 = 1, \quad (6.21)$$

где  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов элемента;  $\varphi_0, \varphi_3$  – вероятность возникновения «обрыва» и «короткого замыкания» соответственно.

При экспоненциальном законе надежности

$$p(t) = e^{-\lambda t}, \quad \varphi_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_0 + \lambda_3}, \quad \varphi_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_3}, \quad (6.22)$$

где  $\lambda_0, \lambda_3$  – интенсивность отказов элемента по «обрыву» и «короткому замыканию» соответственно.

Остальные количественные характеристики надежности в случае необходимости вычисляются через  $P_c(t)$  по известным аналитическим зависимостям, приведенным в главе 1.

Расчет надежности резервированных систем иногда полезно выполнять, используя схему «гибели» («чистого размножения»). В соответствии с этой схемой преобразование Лапласа вероятности возникновения  $n$  отказов вычисляется по формуле

$$P_n(s) = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(s + \lambda_0)(s + \lambda_1) \dots (s + \lambda_n)} . \quad (6.23)$$

При неравных корнях знаменателя обратное преобразование Лапласа  $P_n(s)$  будет

$$P_n(s) = \lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1} \sum_{k=0}^n \frac{e^{s_k t}}{B'(s_k)} . \quad (6.24)$$

В формулах (6.23) и (6.24) приняты обозначения:  $\lambda_0$  – интенсивность отказов системы до выхода из строя первого элемента;  $\lambda_1$  – интенсивность отказов системы в промежутке времени от момента отказа первого элемента до второго;  $\lambda_2$  – интенсивность отказов системы в промежутке времени от момента отказа второго элемента до третьего и т. д.;  $n$  – число отказавших элементов;  $s_k = -\lambda_k$  –  $k$ -й корень знаменателя выражения (6.23);  $B'(s_k)$  – производная знаменателя в точке  $s_k$ .

При одинаковых опасностях отказов  $\lambda_i$ , т. е.  $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$ , расчетные формулы имеют вид:

$$P_n(t) = \frac{\lambda_0^n}{(s + \lambda_0)^{n+1}} ,$$

$$P_n(t) = \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} e^{-\lambda_0 t} . \quad (6.25)$$

При расчетах надежности по формулам (6.23)–(6.25) следует помнить, что они не определяют вероятности безотказной работы (или вероятности отказа) резервированной системы, а определяют лишь вероятность  $i$ -го состояния системы, т. е. вероятность того, что в системе откажут  $n$  элементов. Для вычисления вероятности безотказной работы следует находить вероятности

0, 1, ...,  $n$  отказов, когда система еще находится в работоспособном состоянии (исправна), и суммировать полученные вероятности.

Среднее время безотказной работы системы при использовании схемы «гибели» вычисляется по формуле

$$T_{ср.с} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\lambda_c}, \quad (6.26)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов системы до выхода из строя  $i$ -го элемента.

При схемной реализации резервирования в ряде случаев конкретные технические решения не приводятся к логическим схемам расчёта надёжности (рис. 5.1, 5.2, 5.4, 5.5).

В таких случаях необходимо с целью получения аналитических выражений для количественных характеристик надёжности использовать метод перебора благоприятных гипотез. Вероятность безотказной работы при этом вычисляется по выражению (6.20).

При анализе надёжности резервированных устройств на этапе проектирования приходится сравнивать различные схемные решения. В этом случае за критерий качества резервирования принимается выигрыш надёжности.

*Выигрышем надёжности* называется отношение количественной характеристики надёжности резервированного устройства к той же количественной характеристике нерезервированного устройства или устройства с другим видом резервирования.

Наиболее часто используются следующие критерии качества резервированных устройств:  $G_0(t)$   $i$  – выигрыш надёжности в течение времени  $t$  по вероятности отказов;  $G_0(t)$  – выигрыш надёжности в течение времени  $t$  по вероятности безотказной работы;  $G_T$  – выигрыш надёжности по среднему времени безотказной работы.

При резервировании элементов электроники (резисторов, конденсаторов, контактов реле, диодов и т. п.) всегда произведение интенсивности отказов элемента и времени его работы значительно меньше единицы, т. е.  $\lambda t \ll 1$ , поэтому при вычислении  $G_q(t)$  и  $G_q(p)$  целесообразно функции вида  $e^{-k\lambda t}$  (экспоненциальный случай) разложить в ряд:

$$e^{-k\lambda t} = 1 - k\lambda t + \frac{k^2 \lambda^2 t^2}{2!} \quad (\text{при небольшом } k).$$

Если система исправна при отказе  $m$  элементов, то необходимо брать не менее чем  $m + 2$  членов разложения.

**Пример 6.1.** Дана система, схема расчета надежности которой изображена на рис. 6.2. Необходимо найти вероятность безотказной работы системы при известных вероятностях безотказной работы ее элементов (значения вероятностей указаны на рисунке).

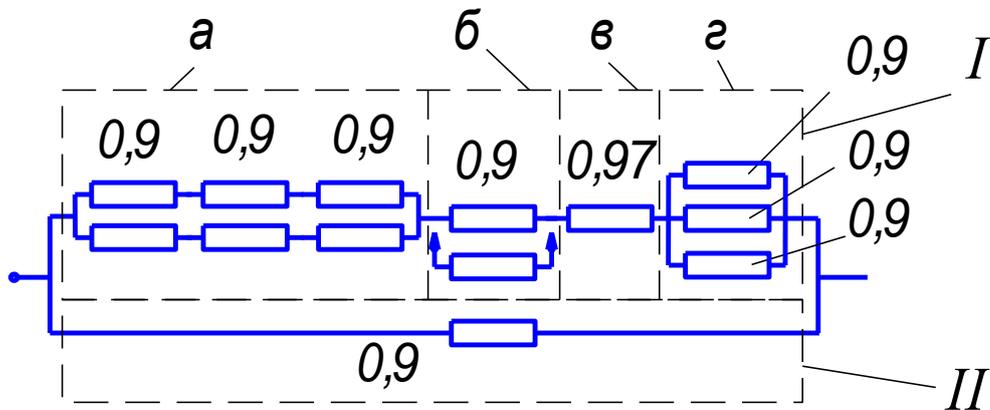


Рис. 6.2. Схема расчета надежности

**Решение.** На рис. 6.2 видно, что система состоит из двух (I и II) неравнонадежных устройств.

Устройство I состоит из четырех узлов: *а* – дублированного узла с постоянно включенным резервом, причем каждая часть узла состоит из трех последовательно соединенных (в смысле надежности) элементов расчета; *б* – дублированного узла по способу замещения; *в* – узла с одним нерезервированным элементом; *г* – резервированного узла с кратностью  $m = 1/2$  (схема группирования).

Устройство II представляет собой нерезервированное устройство, надежность которого известна.

Так как оба устройства неравнонадежны, то на основании формулы (6.3) имеем

$$P_c(t) = 1 - \prod_{t=0}^m [1 - p_i(t)] = 1 - [1 - p_I(t)] \cdot [1 - p_{II}(t)].$$

Определяется вероятность  $p_I(t)$ . Вероятность безотказной работы устройства I равна произведению вероятностей безотказной работы всех узлов, т. е.

$$p_I(t) = p_a p_b p_v p_g.$$

В узле  $a$  число элементов основной и резервной цепи  $n = 3$ , а кратность резервирования  $m = 1$ . Тогда на основании формулы (6.1)

$$p_a = 1 - \left[ 1 - \prod_{i=1}^3 p_i(t) \right] = 1 - \left[ 1 - 0,9^3 \right]^2 \approx 0,93.$$

В узле  $b$  кратность общего резервирования замещением  $m=1$ , тогда на основании формулы (6.9) получается:

$$p_b(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 t} (1 + \lambda_0 t) \approx 0,9(1 + 0,1) = 0,99$$

В узле  $c$  применено резервирование с дробной кратностью, когда общее число основных и резервных систем  $l = 3$ , число систем, необходимых для нормальной работы,  $h = 2$ .

Тогда на основании формулы (6.14) вероятность безотказной работы устройства I будет

$$p_x = p_a p_b p_c p = 0,93 \cdot 0,99 \cdot 0,97 \cdot 0,972 \approx 0,868,$$

а вероятность безотказной работы резервированной системы будет

$$P_0 = 1 - (1 - p_I) (1 - p_{II}) - 1 - (1 - 0,868) (1 - 0,9) = 0,987.$$

**Пример 6.2.** Вероятность безотказной работы преобразователя постоянного тока в переменный в течение  $t = 1000$  ч равна 0,95, т. е.  $P(1000) = 0,95$ . Для повышения надежности системы электроснабжения на объекте имеется такой же преобразователь, который включается в работу при отказе первого. Требуется рассчитать вероятность безотказной работы и среднюю наработку до первого отказа системы, состоящей из двух преобразователей, а также построить зависимости от времени частоты отказов  $f_c(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda_c(t)$  системы.

**Решение.** Из условия задачи видно, что имеет место общее резервирование замещением кратности  $m = 1$ . Тогда на основании формулы (6.9) получается

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 t} (1 + \lambda_0 t)$$

Из условия задачи  $e^{-\lambda_0 t} = 0,95$ , тогда  $\lambda_0(t) \approx 0,05$ . Подстановка значения  $P(1000)$  и значения  $\lambda_0(t)$  в выражение для  $P_c(t)$  позволяет получить

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} (1 + \lambda_0 t) \approx 0,95(1 + 0,05 = 0,9975)$$

Средняя наработка до первого отказа системы на основании формулы (6.10)

$$T_{cp.c} = T_{cp.0}(m + 1) = 2T_{cp.0}$$

Так как в течение времени  $t = 1000$  ч и  $\lambda_0 t = 0,05$ , то  $\lambda_0 = \frac{0,05}{t} = \frac{0,05}{1000} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ , а средняя наработка до первого отказа нерезервированного преобразователя  $T_{ch.0} = \frac{1}{\lambda_0} = \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-4}} = 20\,000$  ч.

Тогда средняя наработка до первого отказа резервированной системы  $T_{cp.c} = 2 T_{cp.0} = 40\,000$  ч.

Для построения графиков  $f_c(t)$  и  $\lambda_c(t)$  находятся аналитические выражения этих функций по известной вероятности безотказной работы системы:

$$f_c = -P_c = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t} (1 + \lambda_0 t) - \lambda_0^2 t e^{-\lambda_0 t} = 0,25 \cdot 10^{-9} t e^{-0,5 \cdot 10^{-8} t}$$

$$\lambda_c(t) = -\frac{f_c}{P_c} = \frac{\lambda_0^2 t e^{-\lambda_0 t}}{e^{-\lambda_0 t} (1 + \lambda_0 t)} = \frac{\lambda_0^2 t}{1 + \lambda_0 t} = \frac{0,25 \cdot 10^{-8} t}{1 + 0,5 \cdot 10^{-8} t}$$

Графики  $f_c(t)$  и  $\lambda_c(t)$  приведены на рис. 6.3.

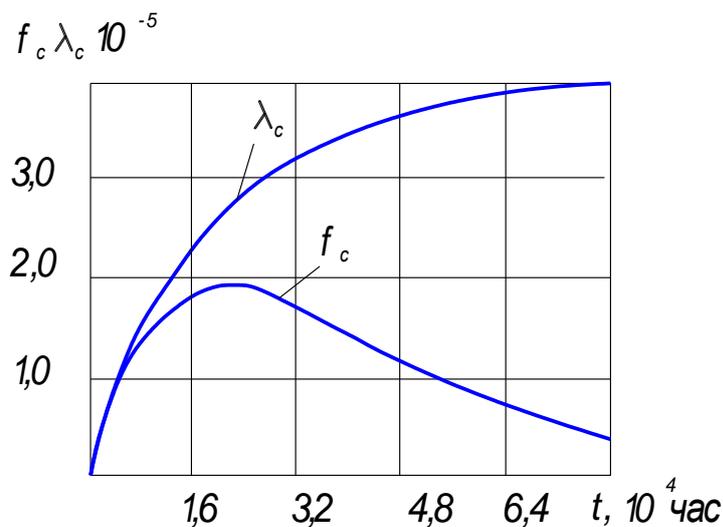


Рис. 6.3. Зависимость  $f_c$  и  $\lambda_c$  от  $t$

Количественно повышение надежности системы в результате резервирования или применения высоконадежных элементов можно оценить по коэффициенту выигрыша надежности, определяемому как отношение показателя надежности до и после преобразования системы. Например, для системы из  $n$  последовательно соединенных элементов после резервирования одного из элементов ( $k$ -го) аналогичным по надежности элементом коэффициент выигрыша надежности по вероятности безотказной работы составит:

$$G_p = \frac{P'}{P} = \frac{P_1 P_2 \dots P_{k-1} [1 - (1 - p_k)^2] P_{k+1} \dots P_n}{P_1 P_2 \dots P_{k-1} P_k P_{k+1} \dots P_n} = \frac{1 - (1 - p_k)^2}{p_k} = 2 - p_k, \quad (6.27)$$

где  $P'$  – вероятность безотказной работы резервированной системы;

$P$  – вероятность безотказной работы нерезервированной системы.

Из формулы (6.27) следует, что эффективность резервирования (или другого приема повышения надежности) тем больше, чем меньше надежность резервируемого элемента (при  $p_k = 0,9$   $G_p = 1,1$ , при  $p_k = 0,5$   $G_p = 1,5$ ).

Следовательно, при структурном резервировании наибольшего эффекта можно добиться при резервировании самых ненадежных элементов (или групп элементов).

В общем случае при выборе элемента (или группы элементов) для повышения надежности или резервирования необходимо исходить из условия обеспечения при этом наилучшего результата.

### **6.3. Замечания к расчетам надежности систем с резервированием**

Расчет количественных характеристик надежности систем с резервированием отдельных элементов или групп элементов во многом определяется видом резервирования. Здесь рассматриваются схемы расчетов для самых распространенных случаев простого резервирования, к которым путем преобразований может быть приведена и структура смешанного резервирования. При этом расчетные зависимости получены без учета надежности переключающих устройств, обеспечивающих перераспределение нагрузки между основными и резервными элементами (т. е. для «идеальных» переключателей). В реальных условиях введение переключателей в структурную схему необходимо учитывать и в расчете надежности систем.

Расчёт систем с нагруженным резервированием осуществляется по формулам последовательного и параллельного соединения элементов аналогично

расчету комбинированных систем. При этом считается, что резервные элементы работают в режиме основных как до, так и после их отказа, поэтому надёжность резервных элементов не зависит от момента их перехода из резервного состояния в основное и равна надёжности основных элементов.

При нагруженном резервировании резервные элементы расходуют свой ресурс, имеют одинаковое распределение наработок до отказа и интенсивность отказов основных  $\lambda_0$  и резервных  $\lambda_p$  элементов одинакова ( $\lambda_0 = \lambda_p$ ).

При нагруженном резервировании различие между основными и резервными элементами часто условное. Для обеспечения нормальной работы (сохранения работоспособности) необходимо, чтобы число работоспособных элементов не становилось меньше минимально необходимого.

Кратность резервирования может быть определена несколько иначе, чем в п. 6.6.1.

Пусть  $n$  – число однотипных элементов в системе;  $r$  – число элементов, необходимых для функционирования системы.

Кратность резервирования – соотношение между общим числом однотипных элементов и элементов, необходимых для работы системы:

$$k = (n - r)/r.$$

Кратность резервирования может быть целой, если  $r = 1$ , или дробной, если  $r > 1$ .

Для системы с последовательным соединением  $n$  элементов (рис. 5.1) при общем резервировании с кратностью  $k$  (рис. 6.4, а)

$$P_{об} = 1 - (1 - p)^{k+1} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i\right)^{k+1}. \quad (6.28)$$

Приведенная формула (6.28) идентична формуле (6.1).

В частности, при дублировании ( $k = 1$ )

$$P_{об} = 1 - (1 - P)^2 = P(2 - P). \quad (6.29)$$

При раздельном резервировании (рис. 6.4, б)

$$P_{раз} = \prod_{i=1}^n \left[1 - (1 - p_i)^{k+1}\right], \quad (6.30)$$

а при раздельном дублировании ( $k = 1$ )

$$P_{раз} = \prod_{i=1}^n \left[1 - (1 - p_i)^2\right] = \prod_{i=1}^n p_i (2 - p_i) = \prod_{i=1}^n (2 - p_i). \quad (6.31)$$

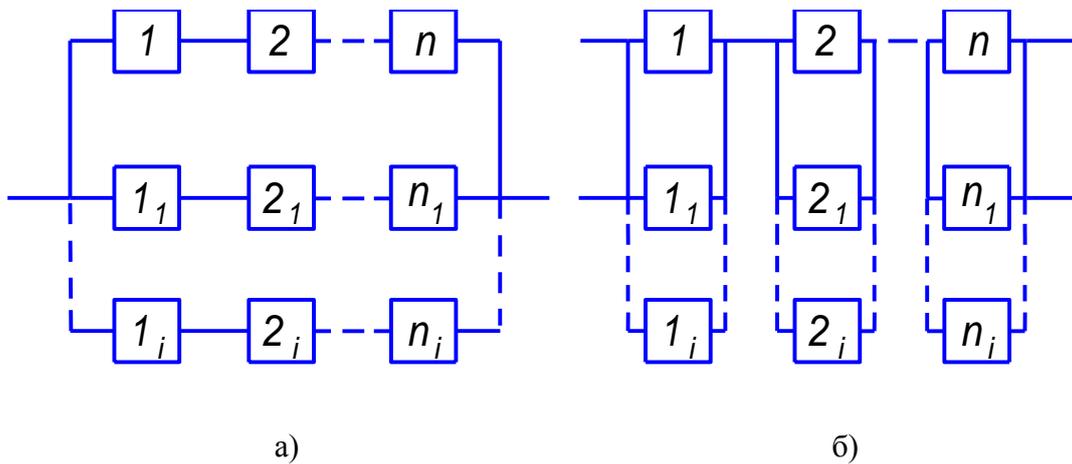


Рис. 6.4. Общее (а) и раздельное (б) нагруженное резервирование

Тогда коэффициенты выигрыша надежности по вероятности безотказной работы при дублировании запишутся в виде:

$$G_{об} = \frac{P_{об}}{P} = 2 - P, \quad G_{раз} = \frac{P_{об}}{P} = \prod_{i=1}^n (2 - p_i), \quad (6.32)$$

откуда следует, что раздельное резервирование эффективнее общего (например, для системы из трех одинаковых элементов при  $P = 0,9$   $G_{об} = 1,27$ ,  $G = 1,33$ ).

При ненагруженном резервировании резервные элементы последовательно включаются в работу при отказе основного, затем первого резервного и т. д. (рис. 6.5), поэтому надежность резервных элементов зависит от момента их перехода в основное состояние. При ненагруженном резервировании резервные элементы не подвергаются нагрузке, их показатели надежности не изменяются и они не могут отказаться за время нахождения в резерве, т. е. интенсивность отказов резервных элементов  $\lambda_p = 0$ .

Такое резервирование в различных ТС встречается наиболее часто, так как по сути оно аналогично замене отказавших элементов и узлов на запасные.

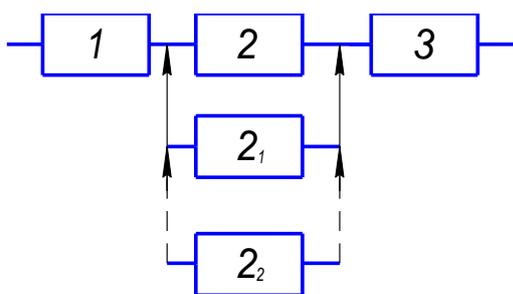


Рис. 6.5. Ненагруженное резервирование

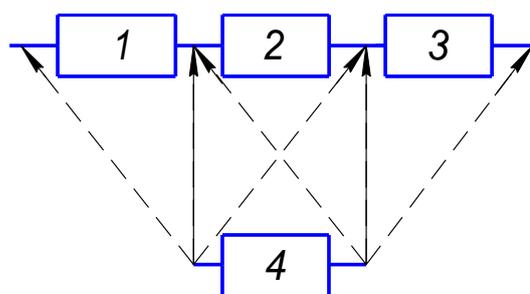


Рис. 6.6. Скользящее резервирование

Если резервные элементы до их включения абсолютно надежны, то для системы с ненагруженным резервированием кратности  $k$  (всего элементов  $k + 1$ )

$$Q = \frac{1}{(k+1)!} \prod_{i=1}^{k+1} q_i; \quad P = 1 - \frac{1}{(k+1)!} \prod_{i=1}^{k+1} (1 - p_i), \quad (6.33)$$

т. е. вероятность отказа в  $(k+1)!$  раз меньше, чем при нагруженном (параллельном соединении, см. формулу (6.35)).

Для идентичных (одинаковых) по надежности основного и резервного элементов

$$P = 1 - \frac{1}{(k+1)!} (1 - p)^{k+1}. \quad (6.34)$$

При экспоненциальном распределении наработки (простейшем потоке отказов) в случае  $\lambda t \ll 1$  можно воспользоваться приближенной формулой

$$P \approx 1 - \frac{(\lambda t)^{k+1}}{(k+1)!}. \quad (6.35)$$

При ненагруженном резервировании средняя наработка на отказ

$$T = \sum_{i=1}^{k+1} T_{0i}, \quad (6.36)$$

а для идентичных элементов  $T_0 = nT_{0i}$ .

Примеры ненагруженного резервирования (рис. 6.7):

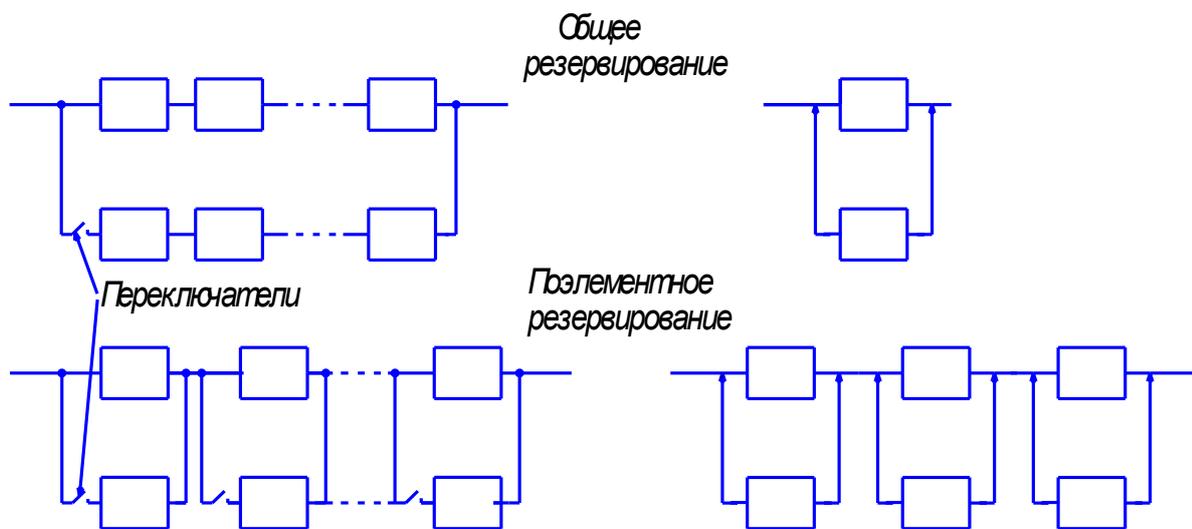


Рис. 6.7. Ненагруженное резервирование

Резервные элементы включаются в работу только после отказа основных. Переключение производится вручную или автоматически (автоматически – включение резервных машин и элементов в энергетике, в бортовых сетях судов и самолетов и т. д.; вручную – замена инструмента или оснастки при производстве, включение эскалаторов в метро в часы «пик» и т. д.).

Если рассмотреть два характерных вида резервирования (рис. 6.8), то очевидно, что при равенстве числа основных и резервных элементов ненагруженный резерв обеспечивает большую надежность. Но это справедливо только тогда, когда перевод резервного элемента в работу происходит абсолютно надежно. Выполнение этого условия связано со значительными техническими трудностями или является иногда нецелесообразным по экономическим или техническим причинам.

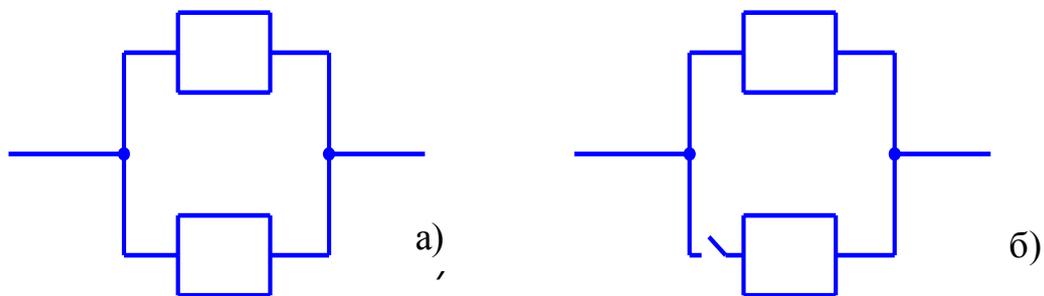


Рис. 6.8. Нагруженное (а) и ненагруженное (б) резервирование

Облегченное резервирование используется при большой инерционности переходных процессов, происходящих в элементе при его переходе из резервного в основной режим, и нецелесообразности применения нагруженного резервирования из-за недостаточного выигрыша в надежности.

Очевидно, облегченный резерв занимает промежуточное положение между нагруженным и ненагруженным. Интенсивность отказов резервных элементов  $\lambda_p$  ниже, чем у основных  $\lambda_0$ , т. е.  $\lambda_0 > \lambda_p$ .

Точные выражения для расчета надежности систем при облегченном резервировании весьма громоздки и неоднозначны, однако при экспоненциальном распределении наработку справедлива приближенная формула

$$P = \frac{t^{k+1}}{(k+1)!} \prod_{i=0}^k (\lambda + i\lambda_0), \quad (6.37)$$

где  $\lambda_0$  – интенсивность отказов элементов в облегченном режиме;  $k$  – кратность резервирования.

Разновидностью ненагруженного резервирования является скользящее резервирование, когда один и тот же резервный элемент может быть использован для замены любого из элементов основной системы.

Скользящее резервирование используется для резервирования нескольких одинаковых элементов системы одним или несколькими одинаковыми резервными (рис. 6.3, здесь все элементы идентичны, а элемент 4 – избыточный). Очевидно, отказ системы произойдет, если из общего количества идентичных элементов (основных и резервных) число отказавших превышает число резервных. Поэтому скользящее резервирование считается активным с дробной кратностью. Расчет вероятности безотказной работы систем со скользящим резервированием аналогичен расчету систем типа « $m$  из  $n$ ».

**Пример 6.3.** Определить безотказность системы, состоящей из двух последовательно соединенных элементов и с одним резервным. Элементы системы взаимозаменяемы. Вероятность безотказной работы элементов известна:  $P(A) = 0,9$ ;  $P(B) = 0,8$ ;  $P(R) = 0,95$ . Схема изображена на рис. 6.9.

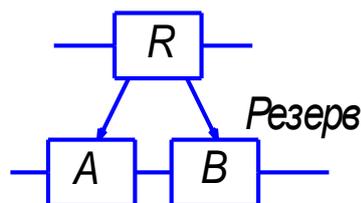


Рис. 6.9. Схема для определения безотказной работы системы с резервным элементом

**Решение.** Вероятность безотказной работы системы без резерва

$$P = P(A) \cdot P(B) = 0,9 \cdot 0,8 = 0,72 .$$

Для определения вероятности безотказности системы необходимо рассмотреть все возможные состояния системы. Определить вероятность каждого состояния системы, затем значения вероятностей, при которых система работоспособна, сложить, и это будет вероятность безотказной работы системы (в данном случае оценка безотказности системы проводится таким же методом, как и для сложных систем). Вычисления записываются в табл. 6.1. Таким образом, вероятность безотказной работы системы, состоящей из двух последовательно соединенных элементов и с одним резервным, равна 0,967.

Данным методом можно определить вероятность безотказной работы любой технической системы с любым возможным подключением резерва, однако это требует довольно громоздких вычислений, правильность которых легко проверяется.

### Значения вероятностей состояния системы

№ п/п	Состояние системы	Вероятность	Отметка о работоспособном состоянии
1	$A \cap B \cap R$	$0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 0,684$	+
2	$A \cap B \cap R$	$0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 0,076$	+
3	$A \cap B \cap R$	$0,9 \cdot 0,2 \cdot 0,95 = 0,171$	+
4	$A \cap B \cap R$	$0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,05 = 0,36$	+
5	$A \cap B \cap R$	$0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,95 = 0,019$	–
6	$A \cap B \cap R$	$0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,05 = 0,004$	–
7	$A \cap B \cap R$	$0,9 \cdot 0,2 \cdot 0,05 = 0,009$	–
8	$A \cap B \cap R$	$0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,05 = 0,001$	–
		$\Sigma = 1,00$	0,967

Таким образом, количественная оценка вероятности отказа системы требует довольно сложной работы, особенно системы, состоящей из большого количества элементов.

Рассмотренный метод оценки безопасности системы можно назвать *индуктивным*. При анализе математической модели вначале вычисляют вероятности состояний системы для всех возможных отказов элементов системы, затем определяют влияние отказа каждого элемента или комбинации элементов на работоспособность системы. При таком подходе случайный пропуск неработоспособных состояний системы маловероятен. Однако метод очень трудоемок, приходится рассматривать все возможные варианты.

При *дедуктивном* методе оценки безотказности системы создание математической модели начинают с выделения одного или нескольких наиболее опасных неработоспособных состояний системы. Переход в каждое из этих состояний, т. е. опасный отказ системы, считается завершающим (главным) событием, которое происходит в результате появления определенных сочетаний первичных событий – отказов отдельных элементов, неправильных действий людей и т. д. Условия, при которых возникает рассматриваемое завершающее событие (опасный отказ системы), сводят в логическую схему, которую изображают в виде ориентированного графа с ветвящейся структурой – «дерева неисправностей».

## Контрольные вопросы

1. Какие виды резервирования существуют? В чем отличие нагруженного и ненагруженного резервирования?
2. Что такое кратность резервирования и в чем отличие целой и дробной кратности?
3. Что представляет собой ненагруженное резервирование и как случайная наработка до отказа системы связана со случайными наработками составляющих систему элементов?
4. Каковы основные допущения, принятые при расчете системы с ненагруженным резервированием?
5. К какому закону распределения стремится наработка до отказа системы при больших значениях кратности резервирования?
6. Проанализируйте, как изменяется вероятность безотказной работы системы с увеличением кратности резервирования.
7. При каких условиях ненагруженное резервирование становится значительно эффективнее нагруженного?
8. Что представляет собой облегченный резерв и в каком виде резервирования он является?
9. Приведите логическую цепь вывода выражения «вероятность безотказной работы» для системы с облегченным резервом.
10. Что представляет собой скользящее резервирование и в каком виде резервирования оно является?

## 7. ОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЗАЩИТА ОТ НИХ

### 7.1. Анализ риска

Под *опасностью* подразумевается источник потенциального вреда или ситуация с потенциальной опасностью.

*Опасным* называется такое событие, которое может нанести вред.

*Риск* определяется как сочетание частоты (вероятности) события и его последствий. Термин «риск» применяется в случаях, когда возникает возможность отрицательных последствий.

*Анализ риска* – действия, выполняемые для определения вероятности и размеров вреда, наносимого людям, имуществу и окружающей среде.

Посредством анализа риска осуществляется поиск ответов на вопросы:

- *какое опасное событие может произойти* (идентификация опасности);
- *какова вероятность* этого события (определение частоты);
- *каковы последствия* опасного события (анализ последствий).

Процесс анализа риска, являющийся частью процесса управления риском, предусматривает такие этапы, как:

- определение области применения;
- идентификация опасности и предварительная оценка последствий;
- оценка величины риска;
- проверка результатов анализа;
- документальное обоснование;
- уточнение результатов анализа с учетом последних данных.

Содержание этапов определено стандартом [16].

Объектами анализа риска могут быть системы, единицы оборудования или изделий.

Под *системой* понимается составной объект любого уровня сложности, содержащий персонал, действия, материалы, оборудование, инструменты, средства обслуживания, программное обеспечение.

На разных этапах анализа риска используются процедуры *оценки риска*, *оценки величины риска* и *оценивания риска*.

*Оценка риска* – общий процесс анализа риска и оценивания риска.

*Оценка величины риска* есть процесс присвоения значений вероятности и последствий риска.

*Оценивание риска* – процесс сравнения присвоенных на предыдущем этапе значений с критериями риска с целью определения его значимости.

*Управление риском* заключается в анализе риска, получении ответов на вопрос, как снизить риск путем выбора управляющих действий, их осуществления и контроля с целью сокращения гибели людей или ущерба их здоровью, урона имуществу и вреда окружающей среде.

## 7.2. Выбор методов анализа риска

Методы анализа риска представлены в [16] основным и дополнительным перечнями. В основной перечень входят наиболее распространенные методы, например *анализ «дерева событий»*, *анализ видов и последствий отказов*, *анализ видов, последствий и критичности отказов*, *анализ «дерева неисправностей»*, *исследование опасности и связанных с ней проблем*, *анализ влияния человеческого фактора* и др.

В дополнительном перечне представлены такие методы, как *классификация групп риска по категориям*, *ведомости проверок*, *Делфи*, *Монте-Карло* и др.

Выбор метода (методов) анализа производится на основе последовательного обсуждения вопросов, в ходе которого выделяются приемлемые для данной системы факторы, а именно:

1. В какой стадии разработки находится система (в стадии разработки концепций, рабочего проекта, модернизации)?
2. Каковы задачи анализа (выбор мер по снижению риска, сопоставление с объектом риска, сравнение альтернативных вариантов)?
3. Какой тип системы и опасности анализируется (простая система, сложная, технологические опасности)?
4. До какого уровня детализируется потенциальная опасность (большое число смертельных исходов, единичные травмы или смертельные исходы, вред окружающей среде, экономические потери)?
5. Какие ресурсы имеются в наличии (ограничены время и опыт, нет ограничений во времени и в возможностях приобретения опыта)?
6. Что известно о системе (имеется концепция проекта, рабочий проект, опыт эксплуатации)?
7. Нужна ли будет модернизация исследований (не нужна, нужна непрерывная модернизация)?
8. Имеются ли требования контрактные и правовые (нет требований, есть ограничения в выборе, нет выбора)?

На этапе *идентификации опасностей* (выявление неустранимых опасностей и способов их проявления) соответствующим образом учитывается, что

человеческие ошибки являются причинами многих аварий, т. е. варианты аварий, возможных вследствие человеческих и организационных ошибок, рассматриваются наряду с вариантами аварий, в которых преобладают технические причины.

При оценивании риска решается проблема выбора варианта для проведения основательного количественного анализа риска – *определение наихудшего варианта аварийной ситуации*. Классификация риска может быть составлена для каждого случая, например, в виде матрицы риска (табл. 7.1).

Таблица 7.1

### Матрица риска

Качественная характеристика частоты события	Частота события в год	Серьезность повреждения			
		Катастрофическое	Значительное	Серьезное	Незначительное
Частое	$> 1$	В	В	В	С
Вероятное	$1-10^{-1}$	В	В	С	М
Случайное	$10^{-1}-10^{-2}$	В	В	М	М
Маловероятное	$10^{-2}-10^{-4}$	В	В	М	М
Неправдоподобное	$10^{-4}-10^{-6}$	В	С	Н	Н
Невероятное	$<10^{-6}$	С	С		Н

*Примечание.* В матрице использована следующая классификация величины риска: В – высокая; С – средняя; М – малая; Н – незначимая.

Применительно к данному примеру серьезность последствия определяется следующим образом:

- катастрофическое последствие – практически полная потеря промышленного объекта или много смертельных исходов;
- значительное последствие – крупный ущерб промышленному объекту или системе, несколько смертельных исходов;
- серьезное последствие – тяжелое ранение, серьезное профессиональное заболевание, серьезный ущерб промышленному объекту или системе;
- незначительное последствие – легкое ранение, профессиональное заболевание легкой формы или незначительное повреждение системы.

С целью устранения возможных в процессе анализа риска элементов субъективизма, способных привести к ошибкам, рекомендуется пересматривать идентифицированные опасности при появлении новых данных.

*Анализ последствий* – преимущественно качественный метод идентификации опасностей, основанный на системном подходе, имеющий характер прогноза и предусматривающий определение воздействия результатов на людей в случаях наступления нежелательных событий. Анализ последствий обычно осуществляют в следующем порядке:

- объект (техническую систему) подразделяют на компоненты;
- для каждого компонента выявляют возможные отказы;
- изучают потенциальные ЧП, которые может вызвать тот или иной отказ на объекте;
- результаты записывают в виде таблицы;
- отказы ранжируют по опасностям и разрабатывают предупредительные меры, включая конструкционные изменения.

### **7.3. Методы проведения анализа риска**

#### **7.3.1. Анализ опасностей и связанных с ними проблем**

Основные задачи метода:

- составление полного описания объекта или процесса с учетом предполагаемых состояний;
- систематическая проверка всех частей объекта или процесса с целью обнаружения путей возникновения отклонений от проектного замысла;
- принятие решения о возможности возникновения опасностей (проблем), связанных с появившимися отклонениями.

В результате исследования можно выделить отклонения, для которых необходимы смягчающие меры. Если эти меры неочевидны или дороги, результаты исследования дают возможность идентифицировать события, необходимые для дальнейшего анализа риска.

#### **7.3.2. Анализ видов, последствий и критичности отказов**

Изучается каждый основной компонент системы с целью определения путей его перехода в аварийное состояние. Анализ является преимущественно качественным и проводится по принципу «снизу вверх» при условии появления аварийных состояний «одно за раз».

*Анализ видов, последствий и критичности отказов* существенно более детален, чем анализ с помощью «дерева неисправностей», так как выявляются все возможные виды отказов или аварийные ситуации для каждого элемента системы.

Например, реле может отказать по следующим причинам:

- контакты не разомкнулись или не сомкнулись;
- запаздывание в замыкании или размыкании контактов;
- короткое замыкание контактов на корпус, источник питания, между контактами и в цепях управления;
- дребезг контактов (неустойчивый контакт);
- контактная дуга, генерирование помех;
- разрыв обмотки;
- короткое замыкание обмотки;
- низкое или высокое сопротивление обмотки;
- перегрев обмотки.

Для каждого вида отказа анализируются последствия, намечаются методы устранения или компенсации отказов и составляется перечень необходимых проверок.

Например, для баков, емкостей, трубопроводов этот перечень может быть следующим:

- переменные параметры (расход, количество, температура, давление, насыщение и т. д.);
- системы (нагрева, охлаждения, электропитания, управления и т. д.);
- особые состояния (обслуживание, включение, выключение, замена содержимого и т. д.);
- изменение условий или состояния (слишком большие, слишком малые, гидроудар, осадок, несмешиваемость, вибрация, разрыв, утечка и т. д.).

Используемые при анализе формы документов подобны применяемым при выполнении предварительного анализа опасностей, но в значительной степени детализированы.

*Анализ критичности* предусматривает классификацию каждого элемента в соответствии со степенью его влияния на выполнение общей задачи системой. Устанавливаются категории критичности для различных видов отказов:

- категория 1 – отказ, приводящий к дополнительному незапланированному обслуживанию;
- категория 2 – отказ, приводящий к задержкам в работе или потере трудоспособности;
- категория 3 – отказ, потенциально приводящий к невыполнению основной задачи;
- категория 4 – отказ, потенциально приводящий к жертвам.

Метод не дает количественной оценки возможных последствий или ущерба, но позволяет ответить на следующие вопросы:

- какой из элементов должен быть подвергнут детальному анализу с целью исключения опасностей, приводящих к возникновению аварий;
- какой элемент требует особого внимания в процессе производства;
- каковы нормативы входного контроля;
- где следует вводить специальные процедуры, правила безопасности и другие защитные мероприятия;
- как наиболее эффективно затратить средства для предотвращения аварий.

### **7.3.3. Анализ диаграммы всех возможных последствий несрабатывания или аварии системы («дерево неисправностей»)**

Данный метод анализа представляет собой совокупность приемов количественного и качественного характера для распознавания условий и факторов, которые могут привести к нежелательному событию («вершинному событию»). Учетные условия и факторы выстраивают в графическую цепь. Начиная с вершины, выявляются причины или аварийные состояния следующих, более низких функциональных уровней системы. Анализируются многие факторы, включая взаимодействия людей и физические явления.

Внимание концентрируется на тех воздействиях неисправности или аварии, которые имеют непосредственное отношение к вершине событий. Метод особенно полезен для анализа систем с множеством областей контакта и взаимодействий.

Представление события в виде графической схемы приводит к тому, что можно без особого труда понять поведение системы и поведение включенных в него факторов. В связи с громоздкостью «деревьев» их обработка может потребовать применения компьютерных систем. Из-за громоздкости затрудняется также проверка «дерева неисправностей».

В первую очередь метод используется при оценке риска для оценки вероятностей или частот неисправностей и аварий. В п 7.4 дано более детальное изложение метода.

### **7.3.4. Анализ диаграммы возможных последствий события («дерево событий»)**

«Дерево событий» (ДС) – алгоритм рассмотрения событий, исходящих от основного события (аварийной ситуации). ДС используется для определения и анализа последовательности (вариантов) развития аварии, включающей слож-

ные взаимодействия между техническими системами обеспечения безопасности. Вероятность каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения вероятности основного события на вероятность конечного события. При его построении используется прямая логика. Все значения вероятности безотказной работы  $P$  очень малы. «Дерево» не дает численных решений.

**Пример 7.1.** Допустим, путем выполнения предварительного анализа опасностей (ПАО) было выявлено, что критической частью реактора, т. е. подсистемой, с которой начинается риск, является система охлаждения реактора; таким образом, анализ начинается с просмотра последовательности возможных событий с момента разрушения трубопровода холодильной установки, называемого иницирующим событием, вероятность которого равна  $P(A)$  (рис. 7.1), т. е. авария начинается с разрушения (поломки) трубопровода – событие  $A$ . Далее анализируются возможные варианты развития событий ( $B, C, D$  и  $E$ ), которые могут последовать за разрушением трубопровода. На рис. 7.1 изображено «дерево исходных событий», отображающее все возможные альтернативы. На первой ветви рассматривается состояние электрического питания. Если питание есть, следующей подвергается анализу аварийная система охлаждения активной зоны реактора (АСОР). Отказ АСОР приводит к расплавлению топлива и к различным, в зависимости от целостности конструкции, утечкам радиоактивных продуктов.

Для анализа с использованием двоичной системы, в которой элементы либо выполняют свои функции, либо отказывают, число потенциальных отказов равно  $2N - 1$ , где  $N$  – число рассматриваемых элементов. На практике исходное «дерево» можно упростить с помощью инженерной логики и свести к более простому дереву, изображенному в нижней части рис. 7.1.

В первую очередь представляет интерес вопрос о наличии электрического питания. Вопрос заключается в том, какова вероятность  $P_B$  отказа электропитания и какое действие этот отказ оказывает на другие системы защиты. Если нет электрического питания, фактически никакие действия, предусмотренные на случай аварии с использованием для охлаждения активной зоны реактора распылителей, не могут производиться. В результате упрощенное «дерево событий» не содержит выбора в случае отсутствия электрического питания, и может произойти большая утечка, вероятность которой равна  $P_A (P_B)$ .

В случае, если отказ в подаче электрической энергии зависит от поломки трубопровода системы охлаждения реактора, вероятность  $P_B$  следует подсчитывать как условную вероятность для учета этой зависимости. Если электрическое питание имеется, следующие варианты при анализе зависят от состояния АСОР. Она может работать или не работать, и ее отказ с вероятностью  $P_{C1}$  ведет к последовательности событий, изображенной на рис. 7.1.

<b>A</b> Гломка трубо- провода	<b>B</b> Электро- питание	<b>C</b> АССР	<b>D</b> Удаление радио- активных продуктов	<b>E</b> Целост- ность замкну- того контура
---	---------------------------------	------------------	---	--

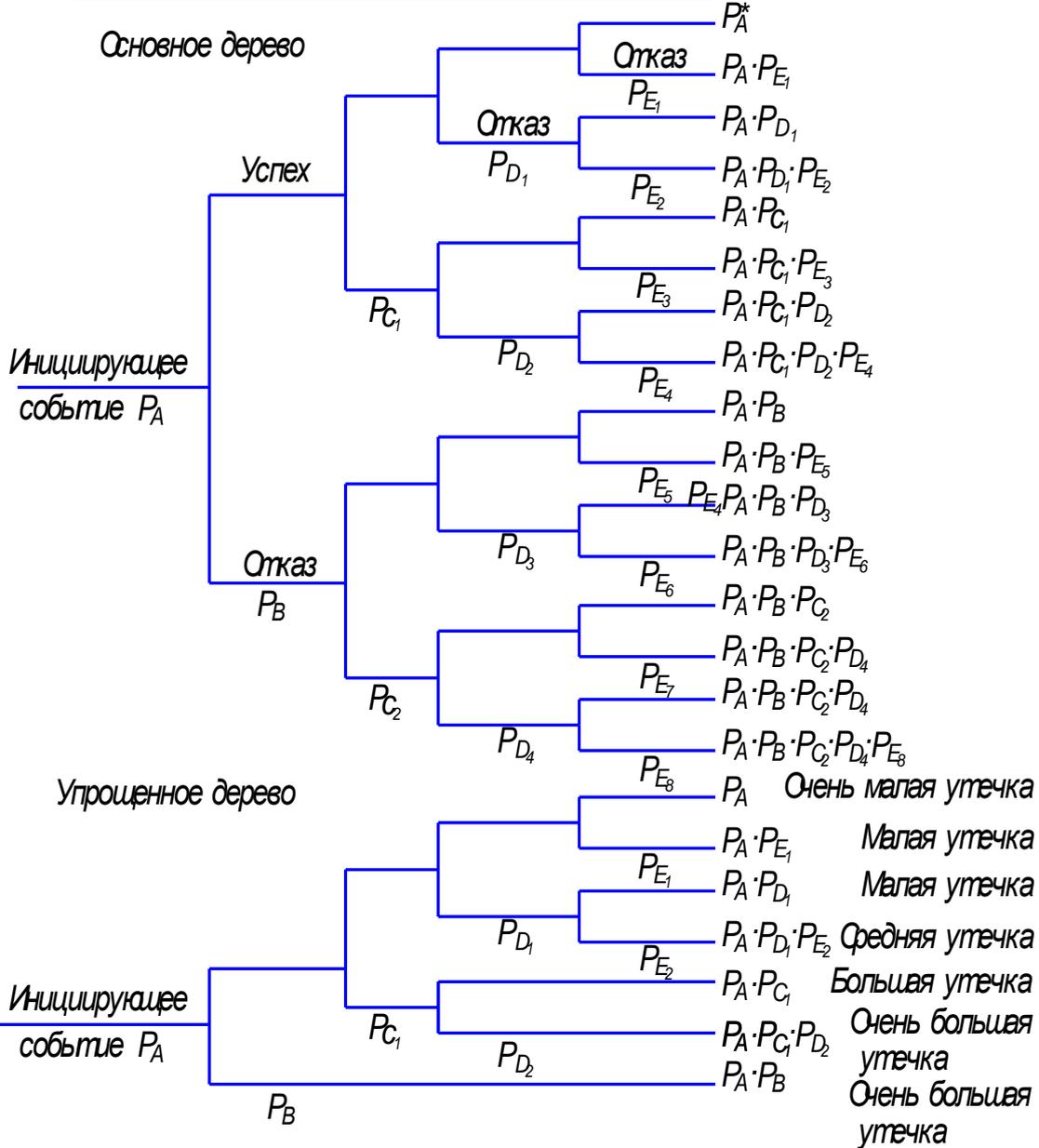


Рис. 7.1. «Дерево событий»

Следует обратить внимание на то, что для рассматриваемой системы возможны различные варианты развития аварии. Если система удаления радиоактивных материалов работоспособна, радиоактивные утечки меньше, чем в случае ее отказа. Конечно, отказ в общем случае ведет к последовательности событий с меньшей вероятностью, чем в случае работоспособности.

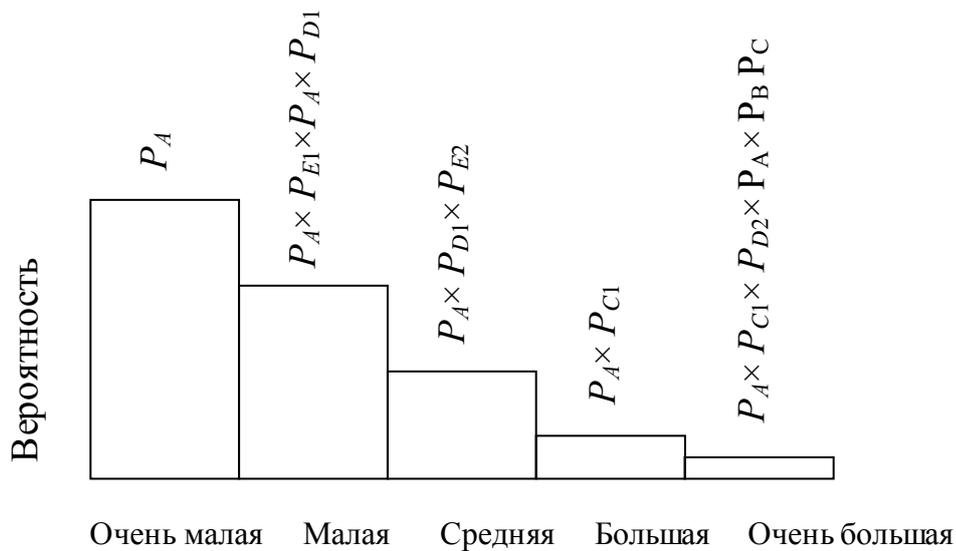


Рис. 7.2. Гистограмма вероятностей для различных величин утечек

Рассмотрев все варианты «дерева», можно получить спектр возможных утечек и соответствующие вероятности для различных последовательностей развития аварии (рис. 7.2). Верхняя линия «дерева» является основным вариантом аварии реактора. При данной последовательности предполагается, что трубопровод разрушается, а все системы обеспечения безопасности сохраняют работоспособность.

### 7.3.5. Предварительный анализ опасностей

Анализ этим методом обычно осуществляют в следующем порядке:

- изучают технические характеристики объекта, используемые источники энергии, рабочие среды, материалы; определяют их повреждающие свойства;
- устанавливают законы, стандарты, правила, действия которых распространяются на данный технический объект, систему, процесс;
- проверяют техническую документацию на ее соответствие законам, правилам, принципам и нормам стандартов безопасности;
- составляют перечень опасностей, в котором указывают идентифицированные источники опасностей (системы, подсистемы, компоненты), повреждающие факторы, потенциальные ЧП, выявленные недостатки.

При проведении предварительного анализа опасностей особое внимание уделяют наличию взрывопожароопасных и токсичных веществ, выявлению компонентов объекта, в которых возможно их присутствие, потенциальным ЧП от неконтролируемых реакций и при повышении давления. После того как в техническом объекте выявлены крупные системы, которые являются источниками опасности, их можно рассмотреть отдельно и более детально исследовать с помощью других методов анализа.

### **7.3.6. Оценка влияния на надежность человеческого фактора**

Метод учитывает влияние человеческого фактора на работу систем и позволяет оценить воздействие ошибок персонала на безопасность и производительность.

Потенциальные возможности для ошибок персонала возникают во многих процессах, при этом зачастую время на принятие верного решения ограничено.

Рассматриваются следующие типы ошибочных действий:

- 1) ошибка по оплошности, недосмотр, когда требуемое действие не выполняется;
- 2) ошибка несоответствия, которая может предусматривать:
  - а) выполнение требуемого действия несоответствующим образом;
  - б) выполнение действия слишком большим или слишком малым усилием либо без требуемой точности;
  - в) выполнение действия в неподходящее для него время;
  - г) выполнение действия в неправильной очередности;
  - д) лишнее или ненужное действие, выполняемое вместо требуемого действия или в дополнение к нему.

Опыт показывает, что ошибочной является практика ограниченной оценки риска, когда внимание концентрируется на механической конструкции и системах управления, а ошибки персонала игнорируются.

Рекомендуется, чтобы процедура анализа содержала следующие этапы:

- 1) анализ задачи с её подробным описанием;
- 2) выявление ошибки персонала – идентифицируются и описываются возможные ошибочные действия при исполнении задачи (выявление ошибки персонала может включать выявление возможных последствий и причин ошибочных действий, а также предложение мер по снижению вероятности этой ошибки, совершенствованию перспектив для исправления и/или уменьшения последствий ошибочных действий);
- 3) количественное определение влияния на надежность человеческого фактора – оценка вероятности правильного выполнения задачи или вероятности ошибочных действий.

### **7.3.7. «Дерево решений»**

Метод «дерева решений», описанный в [64], является разновидностью метода «дерево событий». В «дереве событий» рабочие состояния системы не рассматриваются, так что сумма вероятностей всех событий не равна единице. В «дереве решений» все возможные состояния системы необходимо выразить

через состояния элементов. Таким образом, все состояния системы взаимно увязаны, и их вероятность в сумме должна равняться единице. «Деревья решений» могут использоваться, если отказы всех элементов независимы или имеются элементы с несколькими возможными состояниями, а также есть односторонние зависимости. Они не могут использоваться при наличии двусторонних зависимостей и не обеспечивают логического анализа при выборе начальных событий.

**Пример 7.2.** На рис. 7.3 показана система последовательно соединенных элементов, которая включает насос и клапан, имеющие соответственно вероятности безотказной работы 0,98 и 0,95, а также приведено «дерево решений» для этой системы. Следует отметить, что, согласно принятому правилу, верхняя ветвь соответствует желательному режиму работы системы, а нижняя – нежелательному. «Дерево решений» читается слева направо.

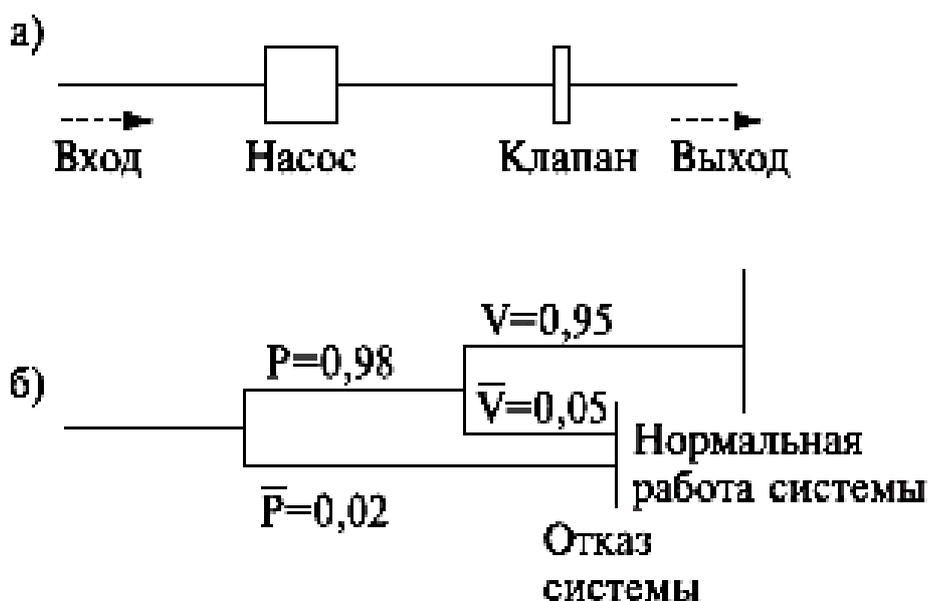


Рис. 7.3. Принципиальная схема (а) и «дерево решений» (б) для двухэлементной системы

Если насос не работает, система отказывает независимо от состояния клапана. Если насос работает, с помощью второй узловой точки ( $V$  и  $\bar{V}$ ) изучается вопрос, работает ли клапан.

Вероятность безотказной работы системы:  $P(t) = 0,98 \cdot 0,95 = 0,931$ . Вероятность отказа:  $Q(t) = 0,98 \cdot (0,05 + 0,02) = 0,069$ , а суммарная вероятность двух состояний системы равна единице.

### 7.3.8. Таблица решений

Метод таблицы решений применяется «при наличии достаточной информации, относящейся к анализируемой системе, а также набора моделей отдельных элементов» [64].

Составляется перечень событий для каждого элемента на его выходе (событий на выходе). Каждое событие на выходе детально определяет состояние выхода. Точно так же определяется совокупность событий на входе каждого элемента для определения состояния на входе. В качестве примера рассматривается клапан теплообменника (рис. 7.3) и события: высокий, средний или низкий расход *на выходе* и высокое, среднее или низкое давление *на входе*. *Внутренние режимы работы* или *состояния элемента* можно рассматривать в виде различных входов со стороны других элементов или со стороны окружающей среды. Открытие клапана может рассматриваться как событие на входе, имеющее три уровня: полностью открытый, нормальный и полностью закрытый (с нулевым открытием).

Если клапан настраивается наладчиком на открытие, оно рассматривается как входное событие со стороны наладчика.

Если открытие клапана не зависит от других элементов, оно считается *входным событием со стороны окружающих условий* для данной системы.

Каждый вход со стороны окружающей среды считают исходным событием, входные события со стороны других элементов являются событиями, отражающими состояние системы или состояние элемента. Все вместе входные и выходные события составляют набор возможных событий, относящихся к рассматриваемой системе.

Пример, рассмотренный в п. 7.3.7, может быть решен с помощью таблицы решения, которая для насоса и клапана имеет вид:

Таблица 7.2

**Таблица решений**

Состояние насоса	Состояние клапана	Вероятность работоспособного состояния	Вероятность отказа системы
Работает	Работает	$0,98 \cdot 0,95$	–
Отказ	Работает	–	$0,02 \cdot 0,95$
Работает	Отказ	–	$0,98 \cdot 0,05$
Отказ	Отказ	–	$0,02 \cdot 0,05$
Суммарная величина		0,931	0,069

Подробное описание метода дано в [64].

## 8. ПОСТРОЕНИЕ «ДЕРЕВА НЕИСПРАВНОСТЕЙ»

### 8.1. «Дерево неисправностей» как модель структуры отказов системы

Метод «дерева неисправностей» («*дерева отказов и неработоспособных состояний*») описан, в частности, в [16], [17]. Особенность метода состоит в том, что он сочетает в себе количественные и качественные приемы анализа.

Согласно стандарту [7], неисправное состояние (*неисправность*) – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. *Отказ* – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Нетрудно заметить, что по структуре «дерево неисправностей» наиболее близко «дереву отказов», используемому рядом авторов [64].

Процедура построения «*дерева неисправностей*» («*дерева отказов*»), «*дерева отказов и неработоспособных состояний*» является удобным методом анализа *причин* отказов и выработки наиболее эффективных мероприятий для их устранения. Анализ проводят для определенного периода функционирования, отдельной части или системы в целом.

«Дерево неисправностей» (отказов, аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий, *несчастных случаев* и пр.) – составная часть логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов и другими событиями (воздействиями). При анализе причин возникновения отказа строится «дерево неисправностей», которое состоит из последовательностей и сочетаний неисправностей и нарушений. Таким образом, оно представляет собой *многоуровневую структуру взаимосвязей*, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения (рис. 8.1).

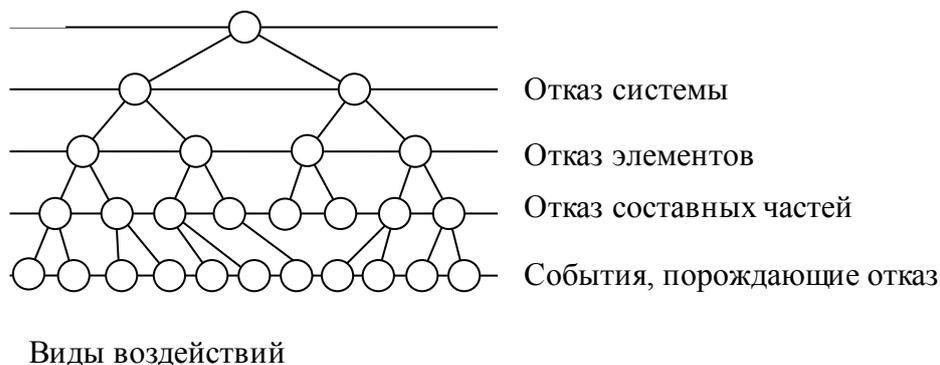


Рис. 8.1. Упрощенная структура «дерева неисправностей»

В [54] «дерево неисправностей» определяется как топологическая модель надежности и безопасности, которая отражает логико-вероятностные взаимосвязи между отдельными случайными исходными событиями в виде первичных отказов или результирующих отказов, совокупность которых приводит к главному анализируемому событию.

## 8.2. Достоинства «дерева неисправностей»

К достоинствам такого метода анализа, как «дерево неисправностей», можно отнести следующее:

- 1) ориентируется на нахождение причин отказов; ограничивается выявлением элементов и событий, приводящих к конкретному отказу системы;
- 2) позволяет показать в явном виде ненадежные места; позволяет специалистам поочередно сосредоточиваться на отдельных конкретных отказах системы;
- 3) обеспечивает глубокое представление о поведении системы и проникновение в процесс её работы;
- 4) представляет собой наглядный материал для той части работников, которые принимают участие в обслуживании системы;
- 5) является средством общения специалистов, поскольку данные представлены в четкой наглядной форме;
- 6) дает возможность выполнять качественный или количественный анализ надежности системы, в том числе возможность:
  - детального изучения отдельных отказов системы,
  - достижения глубокого понимания процесса работы системы,
  - дедуктивного выявления отказов,
  - наглядного обоснования конструктивных изменений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям и анализа компромиссных решений,
  - облегчения анализа надежности сложных систем.

Главное преимущество «дерева неисправностей» (по сравнению с другими методами) заключается в том, что анализ ограничивается выявлением *только тех элементов системы и событий*, которые приводят к данному конкретному отказу системы или аварии.

### 8.3. Недостатки «дерева неисправностей»

К недостаткам такого метода анализа, как «дерево неисправностей», можно отнести следующее:

- 1) значительность затрат средств и времени для осуществления метода;
- 2) «дерево неисправностей» представляет собой схему булевой логики, на которой показывают только два состояния: рабочее и отказавшее, поэтому ему свойственны:
  - а) сложность учёта состояния частичного отказа элементов,
  - б) сложность аналитического решения для деревьев, содержащих резервные и восстанавливаемые узлы,
  - в) сложность охвата множественных отказов,
  - г) необходимость глубокого понимания системы специалистами по надежности,
  - д) необходимость конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа;

3. «дерево неисправностей» описывает систему в определённый момент времени (обычно в установившемся режиме), поэтому трудно показывать последовательности событий, иногда это оказывается невозможным.

### 8.4. Структура «дерева неисправностей»

«Дерево неисправностей» как *многоуровневая структура* содержит конечное событие (вершинное событие), соединяемое с последовательностями более простых отказов (рис. 8.2).

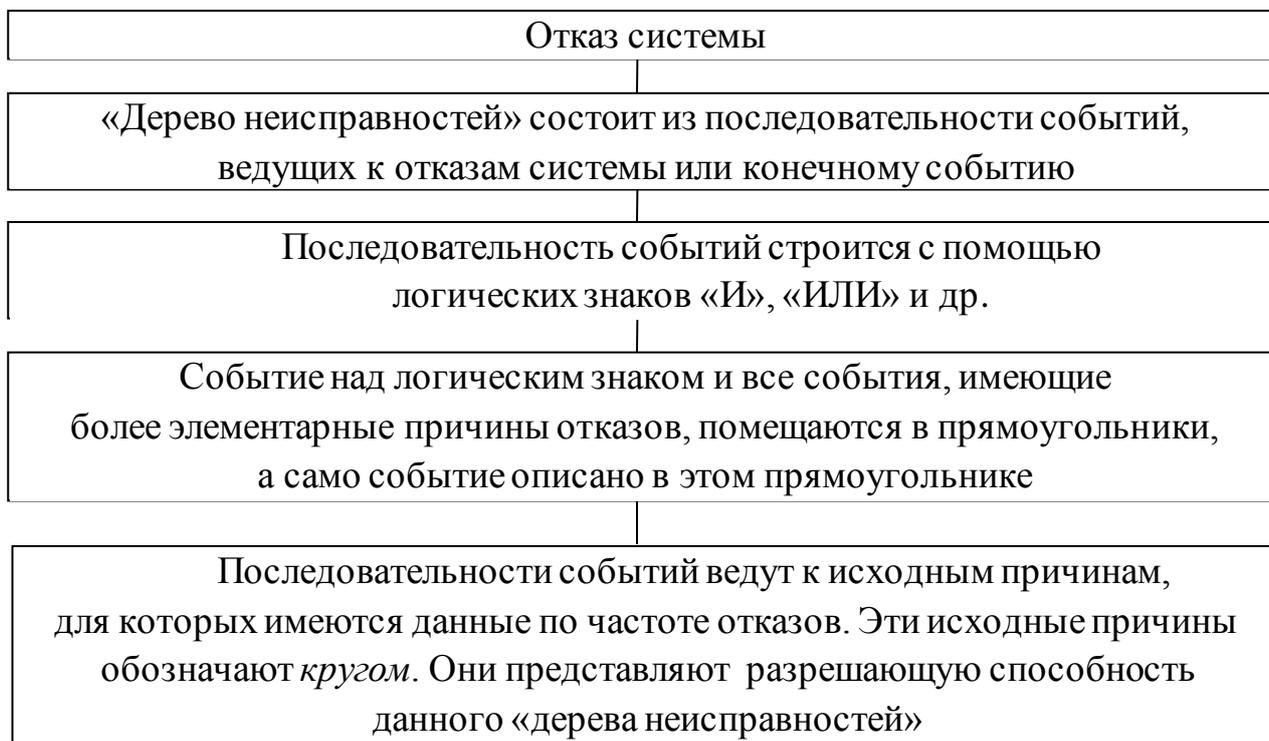


Рис. 8.2. Структура «дерева неисправностей» с описанием содержания

Как видно из рис. 8.2, для отыскания и наглядного представления причинной взаимосвязи с помощью «дерева неисправностей» необходимы *элементарные блоки*, подразделяющие и связывающие большое число событий.

Используется два типа блоков: логические символы (знаки) и символы событий.

Последовательность событий объединяется логическими символами. Распознанные последовательности событий, т. е. те последовательности, которые показывают причинную взаимосвязь событий, приводят к исходным причинам. Исходные причины обеспечиваются данными по *интенсивностям отказов*, используемыми для расчета вероятности отказа системы. Если исходные причины имеют данные по частоте отказов, то они обозначаются кругами.

События, дополняемые описаниями, обозначаются прямоугольниками.

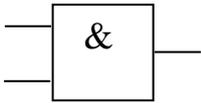
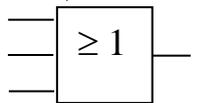
### 8.5. Логические символы

Логические символы (знаки) связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями. Обозначения логических знаков приведены в табл. 8.1.

Логический символ (знак) может иметь один или несколько входов, но только один выход (выходное событие).

Таблица 8.1

**Логические символы (по [16])**

Логический знак		Причинная взаимосвязь
Символ	Название	
	«И»	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно
	«ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий

## Символы «дерева неисправностей» по [16]

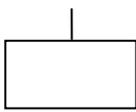
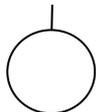
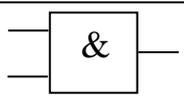
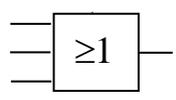
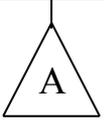
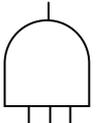
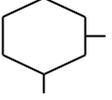
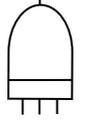
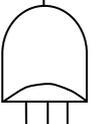
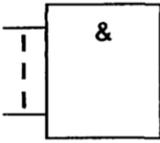
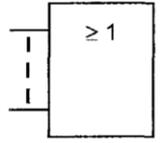
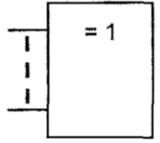
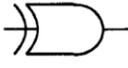
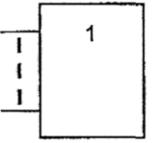
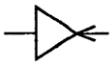
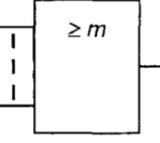
Символ	Функция	Описание
	Блок описания события	Наименование или описание события, код события и вероятность его появления (по мере необходимости) должны быть включены в рамку символа
	Базовое событие	Событие, которое не может быть подразделено
	«И»	Событие происходит только в том случае, если одновременно происходят все составляющие события
	«ИЛИ»	Событие происходит только в том случае, если происходит любое из составляющих событий либо в единственном числе, либо в любом их сочетании
	Вход в блок	Событие, определяемое где-нибудь в другом месте «дерева неисправностей»

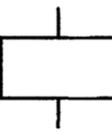
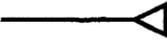
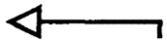
Таблица 8.3

## Альтернативные логические символы [64]

Логический знак		Причинная взаимосвязь
Символ	Название	
	«И»	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно
	«ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий
	«ЗАПРЕТ»	Наличие входа вызывает появление выхода тогда, когда происходит условное событие
	Приоритетное «И»	Выходное событие имеет место, если все входные события происходят в нужном порядке слева направо
	Исключающее «ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается одно (но не оба) из входных событий

## Обозначения символов для анализа «дерева неисправностей» [17]

Символ		Функция	Описание
предпочтительный	допустимый		
		Клапан И	Событие происходит, если все входные события происходят одновременно
		Клапан ИЛИ	Событие происходит, если происходит любое из входных событий (или одно, или в любой комбинации)
		Клапан «исключительное ИЛИ»	Событие происходит, если происходит одно из входных событий (используется обычно с двумя входными событиями)
		Клапан НЕ	Событие представляет собой состояние, которое является инверсией состояния, определенного входным событием (событие, противоположное входному событию)
	—	Клапан ЗАПРЕЩЕНИЯ (запрета)	Событие происходит, если происходит входное событие, приложенное справа, в то время как событие, указанное внутри символа и формирующее условия, выполняется. Если условие вызвано появлением другого события, клапан ЗАПРЕЩЕНИЯ (запрета) подразумевает синхронизацию событий
		Избыточная структура	Событие происходит, если происходит, по крайней мере, $m$ из $n$ входных событий

Символ		Функция	Описание
предпочтительный	допустимый		
	—	Клапан (общая форма)	Общий символ клапана, функция которого указывается внутри символа
	—	Блок описания события	Название или описание события, код события и вероятности появления (при необходимости) должны быть указаны внутри символа
	—	Основное событие	Событие, которое не может быть подразделено на составляющие события
	—	Неразработанное событие	Событие, дальнейшая разработка которого не была проведена (обычно потому, что это предполагалось нецелесообразным)
	—	Анализированное в другом месте событие	Событие, которое разработано в другом дереве неисправностей
	—	Дом	Событие, которое произошло или произойдет обязательно
	—	Нулевое событие	Событие, которое не может произойти
	—	«Переход в»	Событие, определенное в другом месте «дерева неисправностей»
	—	«Переход из»	Событие, переходящее из другого места «дерева неисправностей»

Ключевые слова: риск, надежность, вероятность отказа, система, элемент, отказ, дерево неисправностей, вершина событий.

Как видно из сравнения таблиц, имеются некоторые различия в обозначениях событий и функций.

## 8.6. Правила применения логических символов

**Правило применения логического знака «И».** Если имеются несколько причин, которые должны появиться одновременно, то обычно используют операцию «И». Входы операции должны отвечать на вопрос: «Что необходимо для появления выходного события?».

**Правило применения логического знака «ИЛИ».** Если любая из причин приводит к появлению выходного события, следует использовать операцию «ИЛИ». Входы операции отвечают на вопрос: «Какие события достаточны для появления выходного события?».

**Порядок применения логических знаков «И» и «ИЛИ».** Рассматриваются все возможные события, являющиеся входами операций «ИЛИ», затем входы операций «И». Это справедливо как для головного события, так и для любого события, анализ которого целесообразно продолжить.

Примеры применения логических знаков «И» и «ИЛИ» показаны на рис. 8.3. Событие «возникновение пожара» происходит, если два события («утечка горючей жидкости» и «очаг воспламенения вблизи горючей жидкости») происходят одновременно. Последнее (критическое) событие случается, если происходит одно из двух событий – «наличие искры» или «курящий».

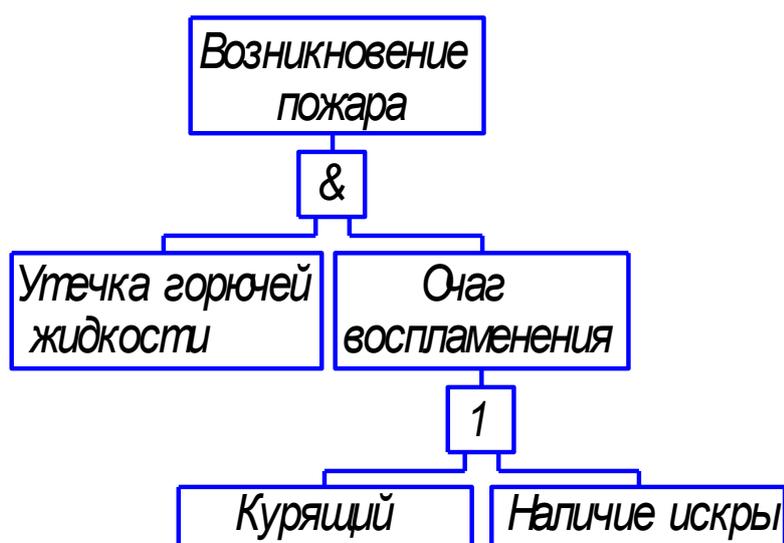


Рис. 8.3. Пример использования логических знаков «И» и «ИЛИ»

**Логический знак запрещения (запрета).** Изображается шестиугольником, используется для представления вероятностных причинных связей. Означает, что выходное событие происходит, если происходят входное и условное события.

Условное событие принимает форму события при условии появления входного события.

Пример использования логического знака запрещения (запрета) показан на рис. 8.4. Под логическим знаком запрещения (запрета) на рис. 8.4, а расположено входное событие в виде прямоугольника, сбоку размещено условное событие в виде овала.

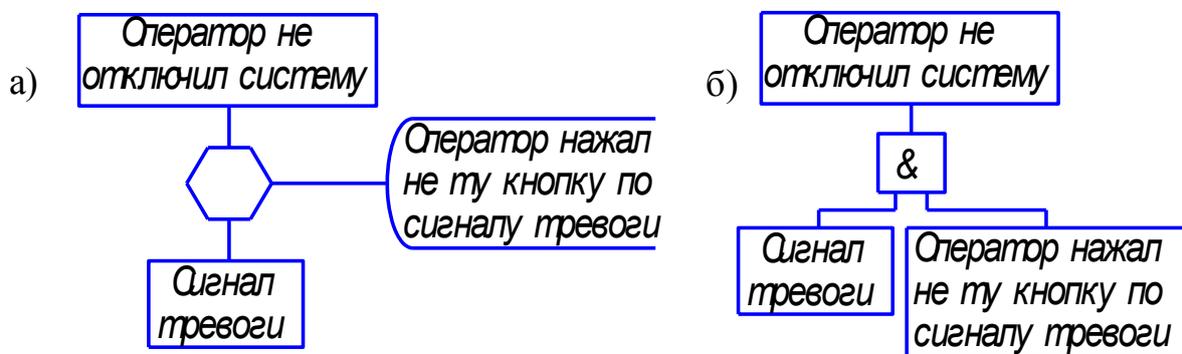


Рис. 8.4. Логический знак запрещения (запрета) (а) и замена его логическим знаком «И» (б)

Логический знак запрещения (запрета) используется для удобства и заменяется логическим знаком «И», как показано на рис. 8.4, б.

**Логический знак «приоритетное И» (табл. 8.1).** Эквивалентен логическому знаку «И» при наличии дополнительного требования о том, чтобы события на входе происходили в определенном порядке.

Событие на выходе появляется, если события на входе происходят в определенной последовательности (слева направо). Нарушение порядка появления событий не вызывает появления выходного события. Например, в системе электропитания, имеющей основной и резервный источники питания, резервный источник включается в работу автоматически переключателем, когда отказывает основной источник.

Питание в системе отсутствует, если отказывают основной и резервный источники или сначала выходит из строя переключатель, а затем отказывает основной источник питания.

Логический символ «приоритетное И» представляется сочетанием «логического И» и «запрета», следовательно, эти логические знаки являются эквивалентом «логического И».

Условным событием для знака «запрет» является то, что входные события логического знака «И» происходят в определенной последовательности. Вследствие этого структуры, показанные на рис. 8.5 и 8.6, эквивалентны.

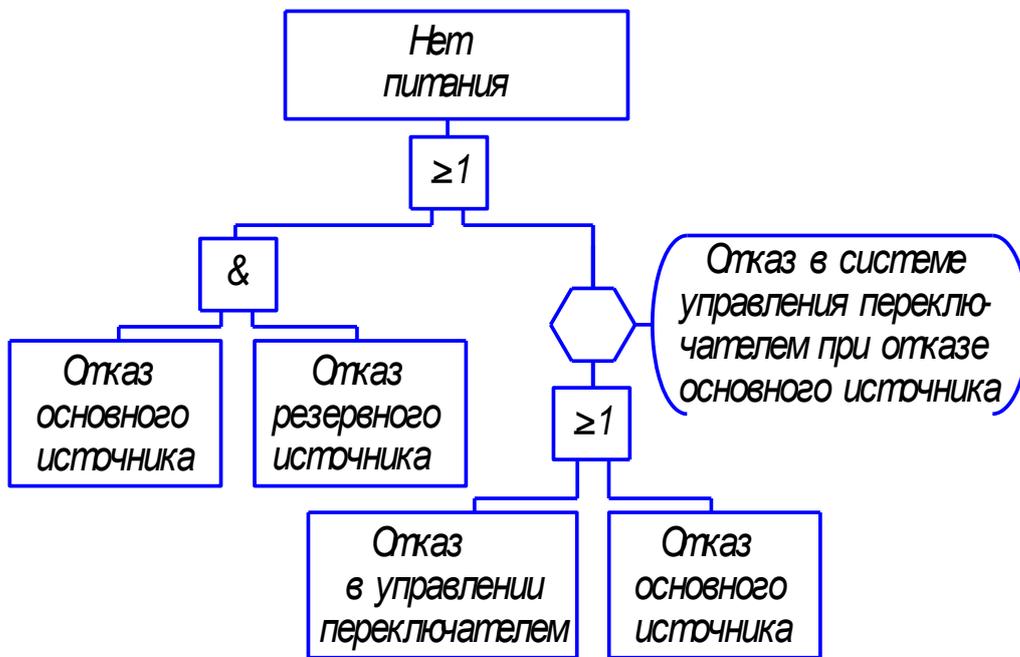


Рис. 8.5. Эквивалентное представление логического знака «приоритетное И»

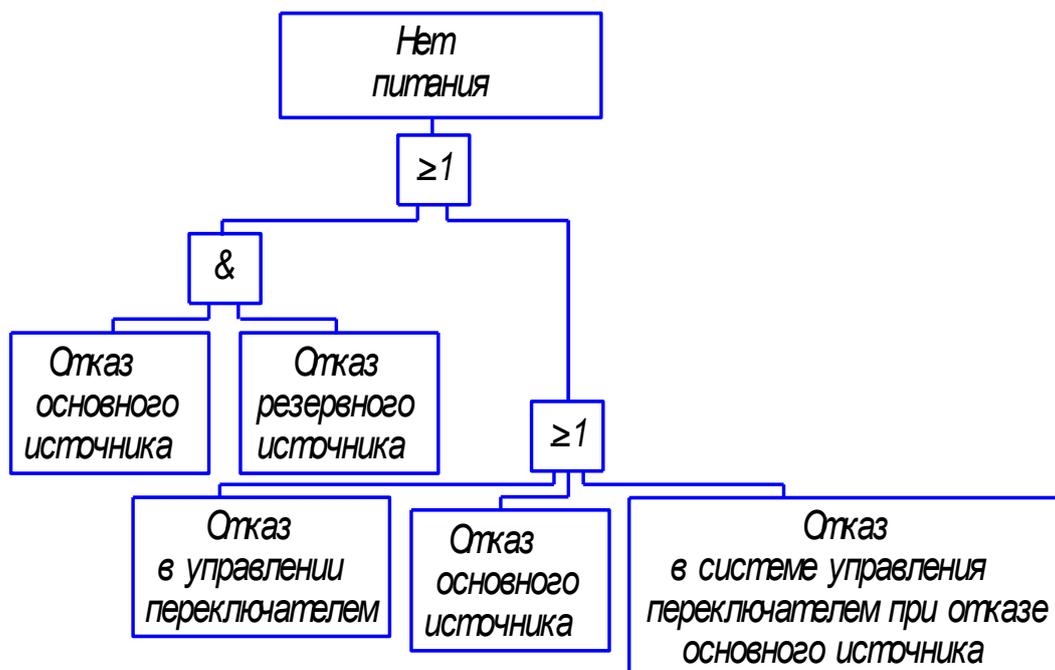


Рис. 8.6. Эквивалентное представление логического знака «приоритетное И»

**Логический элемент «исключительное (исключающее) ИЛИ» (табл. 8.4).** Событие на выходе появляется, если одно из двух (но не оба) событий происходит на входе. Например, в системе, питаемой от двух генераторов, частичная потеря мощности может быть представлена элементом «исключительное (исключающее) ИЛИ» (рис. 8.7). «Исключительное (исключающее) ИЛИ» может быть заменено комбинацией логических элементов «И» и «ИЛИ», что представлено на рис. 8.7.

В «дереве неисправностей» желательно избегать использования работоспособных состояний, таких как «генератор работает», в противном случае усложняется количественный анализ. Разумным подходом является замена логического знака «исключительное (исключающее) ИЛИ» знаком «ИЛИ».

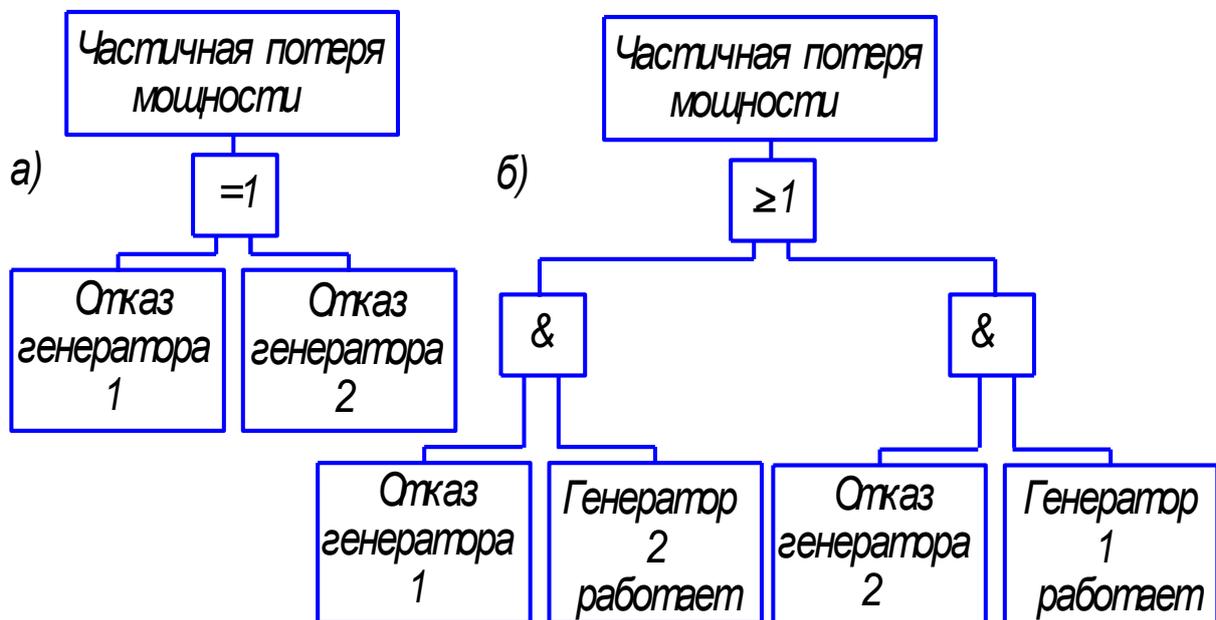


Рис. 8.7. Логический знак «исключительное (исключающее) ИЛИ» (а) и его эквивалентное представление (б)

**Логический знак голосования  $m$  из  $n$  (табл. 8.1).** При наличии  $n$  событий на входе событие на выходе появляется, если происходят по меньшей мере  $m$  из  $n$  событий на входе.

**Пример 8.1.** Имеется система выключения, состоящая из трех контрольных приборов. Предполагается, что выключение системы происходит тогда и только тогда, когда два из трех контрольных приборов выдают сигнал о выключении. Ненужное выключение системы происходит, если два или большее число контрольных приборов подадут ложный сигнал на выключение, в то время как система находится в нормальном состоянии.

Данная ситуация представляется с помощью логического элемента «два из трех» (рис. 8.8). Элемент выбора эквивалентен комбинации из логических элементов «И» и «ИЛИ» (рис. 8.9).

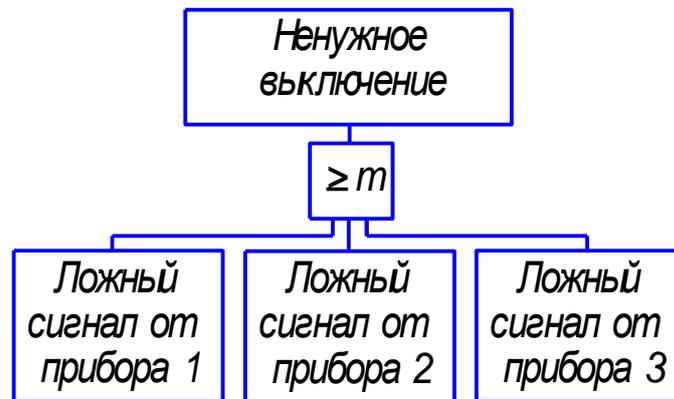


Рис. 8.8. Пример применения логического знака «два из трех»

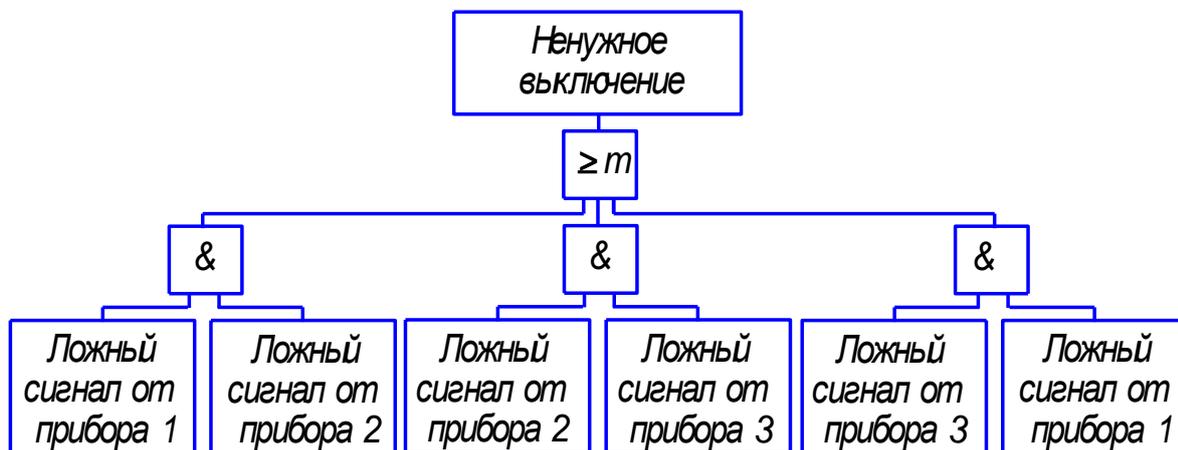


Рис. 8.9. Эквивалентное представление логического знака «два из трех»

Перечень показанных здесь нескольких логических знаков для представления специальных типов первичных связей может быть продолжен. Однако большинство специальных логических символов можно заменить комбинацией логических «И» и «ИЛИ».

## 8.7. Символы событий

Круглый блок – исходный отказ (исходное событие) отдельного элемента в пределах данной системы или окружающей среды, который определяет таким образом разрешающую способность данного «дерева неисправностей» (рис. 8.10).

Прямоугольный блок – такое событие отказа, которое возникает в результате простейших для данной системы исходных отказов, соединенных с помощью логических элементов.

Ромб – детально не разработанное событие в том смысле, что детальный анализ не доведен до исходных типов отказов в силу отсутствия необходимой информации, средств или времени.

Такое событие, как «авария из-за саботажа или диверсии», иллюстрирует детально не разработанные события. Они зачастую не учитываются при количественном анализе, а включаются на начальном этапе как граничные условия, и их присутствие служит показателем глубины данного исследования.

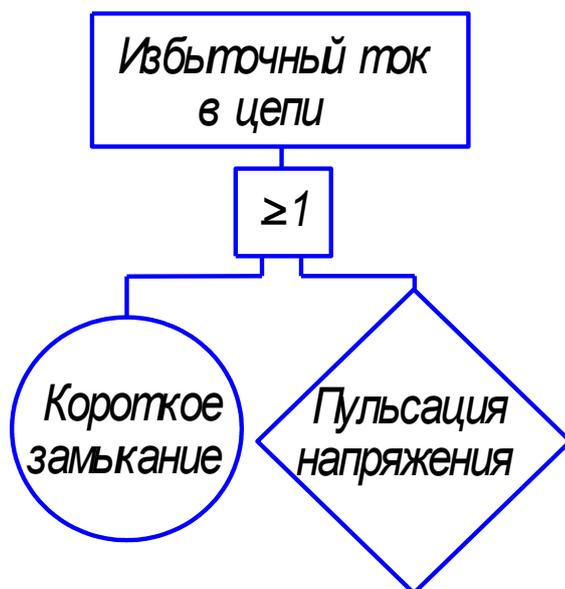


Рис. 8.10. Использование символов событий «круг» и «ромб»

Из рис. 8.10 видно, что отказ «избыточный ток в цепи» может быть вызван исходным событием «короткое замыкание» или событием, не разработанным детально – «пulsация напряжения в цепи».

При более тщательной разработке события «пulsация напряжения в цепи» использовался бы прямоугольник как показатель более глубокого уровня разработки. После чего пришлось бы вернуться к началу анализа и более детально рассмотреть элементы аппаратуры, например генератор.

Символ *домик* – ожидаемое событие. Иногда желательно рассмотреть различные особые случаи «дерева неисправностей», заведомо предполагая, что одни события происходят, а другие исключаются из рассмотрения.

В таких случаях целесообразно пользоваться символом, изображенным в табл. 8.4 в виде *домика*. Когда этот символ включают в «дерево неисправностей», предполагают, что данное событие обязательно происходит, и возникает противоположная ситуация, когда его исключают.

Можно опустить причинные взаимосвязи, расположенные под знаком «И», не учитывая событие, заключенное в домике и стоящее на входе этого логического знака.

Подобным образом можно аннулировать связи под логическим знаком «ИЛИ», присоединив событие, заключенное в домике, непосредственно к этому знаку.

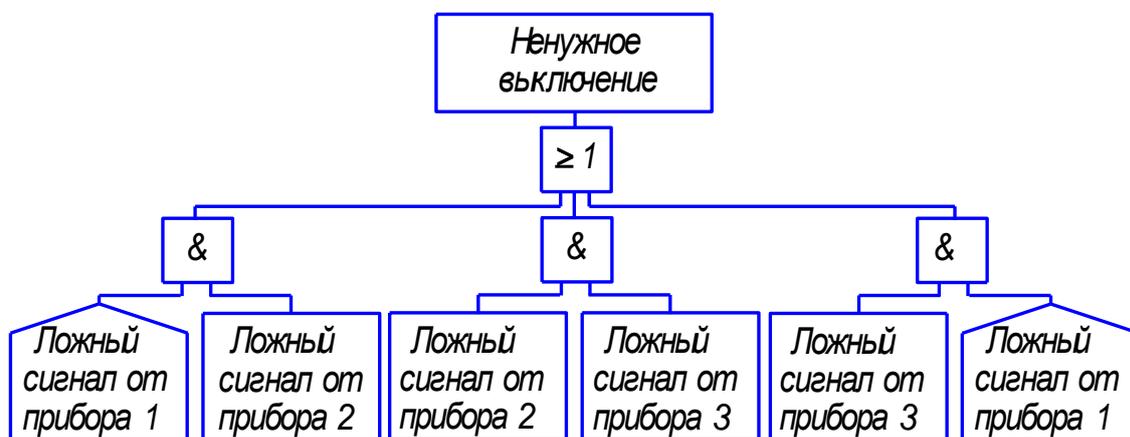


Рис. 8.11. Пример использования символа «домик»

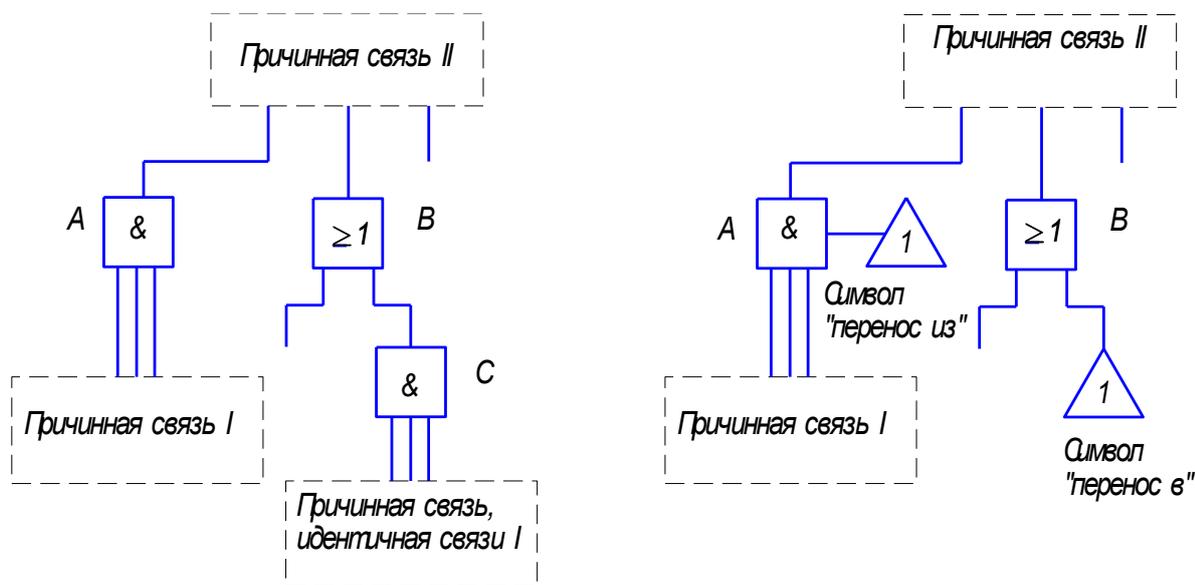


Рис. 8.12. Пример использования символа переноса

В табл. 8.4 помещена пара треугольных символов: *треугольник переноса из* и *треугольник переноса в*, обозначающих два подобных типа причинных взаимосвязей. Обоим треугольникам присвоен одинаковый порядковый номер. Треугольник «переноса из» соединяется с логическим символом сбоку, а у треугольника «переноса в» линия связи проходит от вершины к другому логическому символу. Треугольники используются для того, чтобы упростить изображение «деревя неисправностей» (рис. 8.12).

## 8.8. Последовательность построения «дерева неисправностей»

Предварительно необходимо показать разницу между понятиями «дерево событий» и «дерево неисправностей (отказов)». Согласно [16], анализ «дерева событий» – совокупность приемов идентификации опасности и анализа частот, в которых используется индуктивный подход с целью перевода в возможные исходы различных иницирующих событий. Пример «дерева событий» показан на рис. 8.13.

Анализ «дерева неисправностей» – совокупность приемов идентификации опасности и анализа частот нежелательного события, с помощью которых определяются все пути реализации нежелательного события. Пример «дерева неисправностей» показан на рис. 8.14.

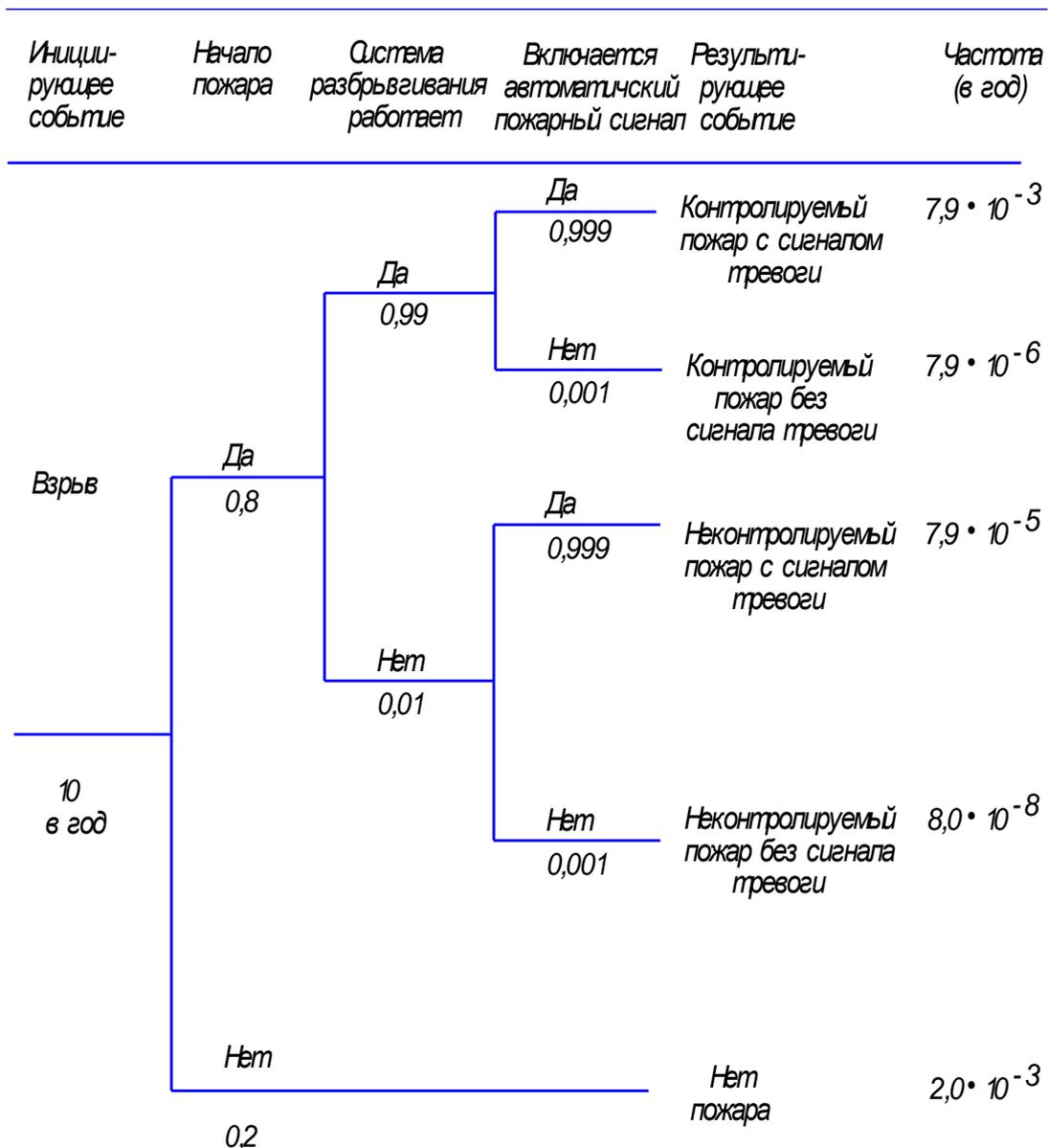


Рис. 8.13. Пример «дерева событий» для взрыва пыли

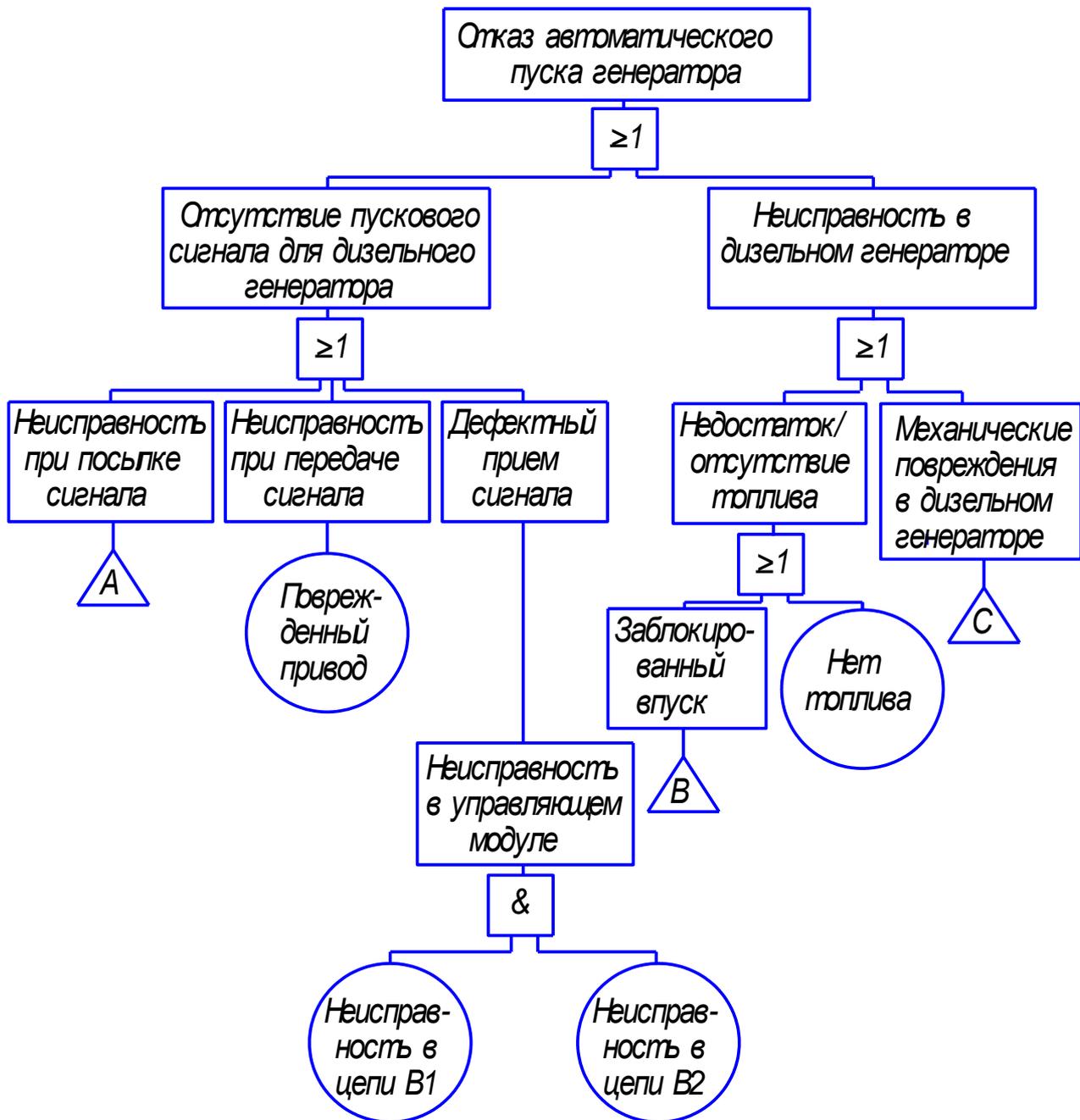


Рис. 8.14. Пример «дерева неисправностей» [16]

Ранее упоминалось, что, согласно [16], могут применяться как основные, так и дополнительные методы анализа риска (надежности). В табл. 8.5 и 8.6 приведены перечни методов анализа риска.

**Перечень наиболее распространенных методов,  
используемых при анализе риска [16]**

Метод	Описание и применение	Ссылка
Анализ «дерева событий»	Совокупность приемов идентификации опасности и анализа частот, в которых используется индуктивный подход с целью перевода различных инициирующих событий в возможные исходы	А.4 приложения А [16]
Анализ видов и последствий отказов; анализ видов, последствий и критичности отказов	Совокупность приемов идентификации главных источников опасности и анализа частот, с помощью которых анализируются все аварийные состояния данной единицы оборудования на предмет их влияния как на другие компоненты, так и на систему в целом	А.2 приложения А [16]
Анализ «дерева неисправностей»	Совокупность приемов идентификации опасности и анализа частот нежелательного события, с помощью которых определяются все пути его реализации. Используется графическое изображение	А.3 приложения А [16]
Исследование опасности и связанных с ней проблем	Совокупность приемов идентификации фундаментальной опасности, при помощи которых оценивается каждая система с целью обнаружения того, могут ли происходить отклонения от назначения конструкции и какие последствия это может повлечь	А.1 приложения А [16]
Анализ влияния человеческого фактора	Совокупность приемов анализа частот в области воздействия людей на показатели работ системы, при помощи которых определяется влияние ошибок человека на надежность	А.6 приложения А [16]

**Перечень дополнительных методов,  
используемых при анализе риска [16]**

Метод	Описание и применение
Классификация групп риска по категориям	Классификация видов риска по категориям в порядке приоритетности групп риска
Ведомости проверок	Составление перечней типовых опасных веществ и/или источников потенциальных аварий, которые нуждаются в рассмотрении. С их помощью можно оценивать соответствие законам и стандартам
Общий анализ отказов	Метод, предназначенный для определения того, возможен ли случайный отказ (авария) ряда различных частей или компонента в рамках системы, и оценки его вероятного суммарного эффекта
Модели описания последствий	Оценка воздействия событий на людей, имущество или окружающую среду. Используются как упрощенные аналитические подходы, так и сложные компьютерные модели
Метод Делфи	Способ комбинирования экспертных оценок, которые могут обеспечить проведение анализа частоты, моделирования последствий и/или оценивания риска
Индексы опасности	Совокупность приемов по идентификации/оценке опасности, которые могут быть использованы для ранжирования различных вариантов системы и определения менее опасных вариантов
Метод Монте-Карло и другие методы моделирования	Совокупность приемов анализа частоты, в которых используется модель системы для оценки вариаций в исходных условиях и допущениях
Парные сопоставления	Способ оценки и ранжирования совокупности рисков путем парного сравнения
Обзор данных по эксплуатации	Совокупность приемов, которые могут быть использованы для выявления потенциально проблемных областей, а также для анализа частоты, основанного на данных об авариях, данных о надежности и пр.
Анализ скрытых процессов	Метод обнаружения выявления скрытых процессов и путей, которые могли бы привести к наступлению непредвиденных событий

### 1. Выделить систему.

Уместно напомнить признаки системы [64, с. 65]:

*система состоит из таких элементов, как единицы оборудования, материалы, персонал предприятия, причем не обязательно, чтобы эти элементы были самыми мелкими в системе; они могут быть блоками или целыми подсистемами, которые находятся в определенной окружающей и социальной сфере и подвержены старению.*

При оценке надежности технологической системы нужно ответить на вопросы:

- Что в системе является источником опасности?
- Что нужно сделать, чтобы уменьшить опасность?
- Как устранить последствия?

#### *А. Установление ограничений*

### 2. Дать описание системы.

Описать условия окружающей среды. Определить рабочие условия и состояния системы, для которых производится анализ надежности и риска, и ввести ограничения.

Перечислить выделяемые виды энергии, материалов и информации, превышающие допустимые пределы.

Определить зоны контакта со смежными системами. Смежными системами являются «поставщики» и «приемники» энергии, сырья, материалов, информации и готового продукта.

Особое внимание уделить безопасности.

#### *Б. Анализ структуры*

### 3. Показать общую структуру системы.

Предлагается следовать схеме на рис. 8.1 Предварительно необходимо оценить, достаточно ли ограничиться выявлением элементов, вызывающих отказ системы (например, уровни 1–3), или же требуется найти более глубокие, менее явные причины выхода из строя элементов (уровни с 4 по 5). Выявление скрытых причин отказов таких элементов производится в ходе ряда последовательных попыток с учетом выявления главных причин отказов.

Для наглядности строится упрощенная структура «дерева неисправностей» (рис. 8.2) или же сразу показывается действительная структура системы (рис. 8.15). Здесь А, Б, ... Я – обозначения событий; круглые блоки – элементы системы от 1 до n. Круглых и прямоугольных блоков может быть несколько для каждого логического оператора.

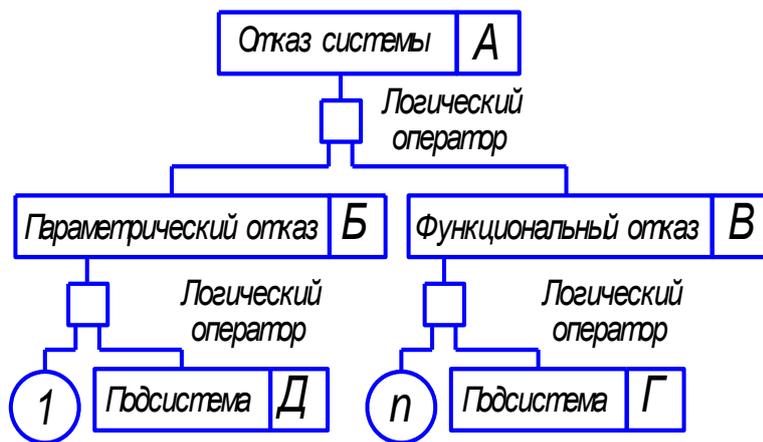


Рис. 8.15. Действительная структура «дерева неисправностей»

4. Установить признаки работоспособности системы. Перечислить опасные состояния системы – отказы. Определить виды отказов (параметрический, функциональный или, согласно [64], первичный, вторичный и т.д.). Удобно пользоваться диаграммой, показанной на рис. 8.16.

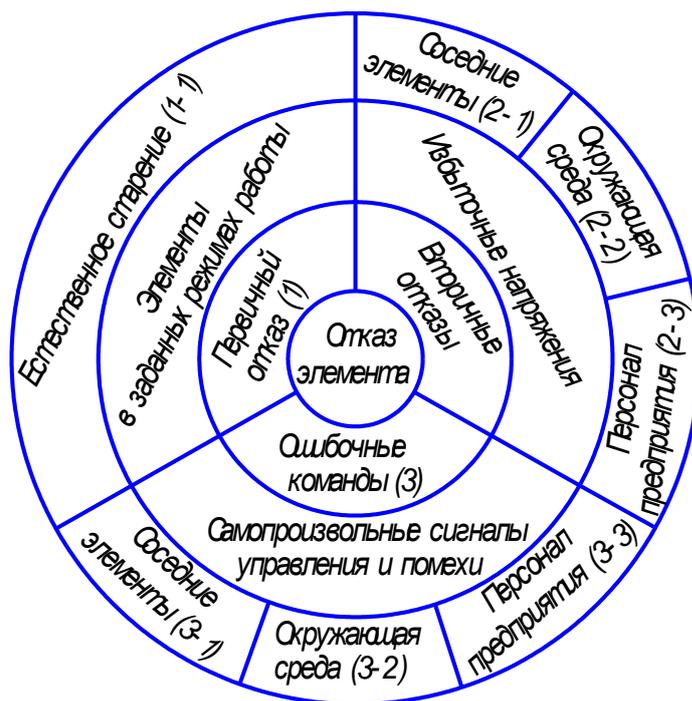


Рис. 8.16. Характеристики отказов элементов

*Параметрический отказ* – рабочее состояние, в которое приходит система по окончании периода технологической надежности или периода, в течение которого системой обеспечиваются заданные пределы допустимых изменений выходных параметров.

*Функциональный отказ* – нерабочее состояние элементов и подсистем, наступившее в результате их внезапных отказов.

*Первичный отказ* элемента – нерабочее состояние этого элемента, причиной которого является он сам. Для возвращения элемента в рабочее состояние необходимо выполнить ремонтные работы. Первичные отказы происходят при входных воздействиях, значения которых находятся в пределах, лежащих в расчетном диапазоне. Возникновение отказов объясняется естественным старением элементов. Пример первичного отказа – разрыв сосуда, работающего под давлением, вследствие усталости материала.

*Вторичный отказ* – подобие первичного, за исключением того, что сам элемент не является причиной отказа. Вторичные отказы возникают под воздействием на элементы избыточных напряжений, испытанных ранее и действующих в настоящее время.

Параметры этих напряжений (амплитуда, частота, продолжительность действия) могут выходить за пределы допусков или иметь обратную полярность, а их изменение может быть вызвано различными источниками энергии: термической, механической, электрической, химической, магнитной, радиоактивной и т. п.

Напряжения могут быть вызваны соседними элементами или окружающей средой, например метеорологическими и геологическими условиями, а также воздействием со стороны других технических систем.

Люди, например операторы и контролеры, также являются возможными источниками вторичных отказов, если их действия приводят к выходу элементов из строя. Примеры вторичных отказов: «срабатывание предохранителя от повышенного электрического тока», «повреждение емкостей для хранения жидкостей при землетрясении». При этом устранение источников повышенных напряжений не гарантирует возвращения элемента в рабочее состояние, так как предыдущая перегрузка могла вызвать необратимое повреждение в элементе, устраняемое в ходе ремонтных работ.

Когда точный вид первичного или вторичного отказа определен и данные по этому отказу получены, а события с первичными и вторичными отказами оказываются одинаковыми, они рассматриваются как исходные отказы, которые в дереве отказов помещаются в *круглые блоки*.

*Ошибочные команды* – отказ элемента из-за неправильного сигнала управления или помехи. Для возвращения данного элемента в рабочее состояние ремонт зачастую не требуется. Самопроизвольные сигналы управления или помехи не обязательно часто оставляют последствия в виде повреждений, в последующих нормальных режимах элементы работают согласно заданным требованиям.

Типичные примеры ошибочных команд: «напряжение приложено самопроизвольно к обмотке реле», «переключатель случайно не разомкнулся из-за помех», «помехи на входе контрольного прибора в системе безопасности вызвали ложный сигнал на остановку», «оператор не нажал аварийную кнопку» (ошибочная команда от аварийной кнопки).

На основании вышеизложенного делается вывод, что отказы могут возникнуть в результате: 1) первичных отказов, 2) вторичных отказов или 3) ошибочных команд.

Для определения вида отказов нужно воспользоваться общим описанием системы и выполнить следующее:

а) изучить технические характеристики объекта;

б) установить, какие параметры являются выходными, например, для емкостных аппаратов (котлы, реакторы и т. п.) такими параметрами могут быть температура, давление, расход рабочей жидкости или газа; для металлообрабатывающего – соответствие полученных при обработке размеров заданным размерам с учетом предельных отклонений и шероховатости поверхностей.

**Пример 8.2.** Для двигателя внутреннего сгорания важным параметром является удельный расход топлива, повышенный расход которого не является функциональным отказом, но ухудшает экономические показатели.

Другой важный параметр двигателя – тепловой режим. Отклонение от нормы – перегрев, наступление которого является следствием многих причин, в том числе может объясняться и недостатками системы питания топливом. В случае перегрева двигателя требуется немедленное принятие мер, в частности переключение на низшую передачу при одновременном уменьшении нагрузки (остановка двигателя не рекомендуется во избежание заклинивания кривошипно-шатунного механизма).

5. Разбить систему на подсистемы (механическая, электрическая, гидравлическая, пневматическая и др.).

6. Выделить подсистемы в подсистемах.

Выделение подсистем в подсистемах производится в зависимости от состава рассматриваемой подсистемы. Например, в электрической подсистеме выбирается элемент «электродвигатель» и, в свою очередь, делится на механическую и электрическую подсистемы низшего уровня.

7. Составить перечни элементов для системы и подсистем.

Воспользовавшись имеющейся технической документацией, изучить описания, чертежи, схемы, назначение и последовательность работы элементов. Последовательность составления перечней – сверху вниз и слева направо.

Для этого внимательно проследить за действием каждого элемента в системе и выделить более важные и менее важные, после чего обозначить указанные группы элементов.

8. Выяснить, состояние каких элементов является ключевым для поддержания необходимых параметров в допустимых пределах работоспособности.

На чертежах, электрической, кинематической, гидравлической и других схемах подсистем выбранные элементы показываются выносными линиями с номерами. Это необходимо для повторных обращений к схемам.

9. Построить «дерево неисправностей» (отказов), используя обозначения табл. 8.4.

*В. Количественная оценка вероятностей отказов*

10. Найти значения интенсивностей отказов для элементов в нормативной документации (ГОСТ, РД и др.).

В приложениях части 2 данного учебного пособия приведены таблицы значений интенсивностей отказов из ССБТ ГОСТ 12.1.004–91 и РД 26-01-143-83.

11. Определить интервалы времени, в которых делаются расчеты.

Помня, что производится расчет надежности с целью определения риска, нужно ориентироваться на типовые случаи для данного класса систем. Возможны ситуации 1) когда известна средняя наработка до отказа таких систем и 2) когда такие сведения отсутствуют. В последнем случае производится выбор интервала времени для расчета.

Как известно, при оценке надежности в период нормальной эксплуатации принимается, что интенсивность отказов постоянна и не зависит от времени эксплуатации системы

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const}, \quad (8.1)$$

где  $\lambda = 1/m_t$ ;  $m_t$  – средняя наработка до отказа (ч), откуда

$$m_t = 1/\lambda \quad (8.2)$$

или

$$m_t \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (8.3)$$

где  $t$  – наработка до отказа  $i$ -го изделия;  $N$  – общее число наблюдений.

Тогда  $\lambda$  выражается числом отказов в час и, как правило, составляет малую величину.

Интервалы времени выбираются с учетом технических характеристик системы, имеющих в техническом паспорте или в технической литературе, содержащей данные по параметрам надежности аналогов. Необходимо помнить, что высокая надежность обеспечивается при малом сроке службы, например, вероятность безотказной работы  $P(t) \approx 0,9$  достижима при малом сроке службы  $\approx 0,1 T$ .

Учитывается также, что каждый элемент системы имеет свой срок службы и что интенсивность нагрузки на каждый элемент различна. Кроме этого, система может работать с разной интенсивностью, тогда вероятность отказа определится для двух режимов работы по формуле

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \exp(-\lambda_1 t_1 - \lambda_2 t_2).$$

В качестве решающего критерия при выборе расчетных значений  $T_i$  может быть принят тот факт, что анализ ограничивается выявлением тех элементов, отказ которых привел к отказу системы, а «дерево» строится для данного конкретного отказа.

Приведенный перечень подходов к выбору расчетных значений  $T_i$  предназначен для практического использования.

12. Определить, какими логическими функциями связаны элементы системы (параллельность или последовательность включения в работу отдельных элементов).

На данном этапе устанавливается степень зависимости состояния системы от положения элемента в структуре и его состояния.

13. Рассчитать вероятность безотказной работы каждого элемента.

Ранее (п. 8.1) отмечено, что вероятность безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону распределения времени безотказной работы и одинакова в любых одинаковых промежутках времени в период нормальной эксплуатации.

Необходимо помнить, что существенное достоинство экспоненциального распределения – его простота: оно имеет только один параметр – время  $t$ .

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) = \exp(-\lambda t) = e^{-\lambda t}. \quad (8.4)$$

Расчет по (8.4) в пределах четырех знаков после запятой дает точное совпадение.

Вероятности безотказной работы элементов (подсистем) рассчитываются по известным формулам:

а) для параллельного соединения элементов (оператор «ИЛИ»)

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)), \quad (8.5)$$

тогда вследствие

$$\begin{aligned} P(t) + Q(t) &= 1, \\ Q(t) = 1 - P(t) &= \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)); \end{aligned}$$

б) для последовательного соединения элементов (оператор «И»)

$$\begin{aligned} P(t) &= \prod_{i=1}^n P_i(t), \\ Q(t) = 1 - P(t) &= 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t); \end{aligned} \quad (8.6)$$

в) для операции «инверсия»

$$P(A_1) = 1 - P(A), \quad (8.7)$$

где  $A_1$  и  $A$  – события на входе и выходе.

Если  $\lambda t \leq 0,1$ , то формула для вероятности безотказной работы упрощается в результате разложения в ряд и отбрасывания малых членов:

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t. \quad (8.8)$$

**Пример 8.3.** Оценить вероятность  $P(t)$  отсутствия внезапных отказов механизма в течение  $t = 10\,000$  ч, если интенсивность отказов составляет  $\lambda = 1/m_t = 10^{-4}$  1/ч.

**Решение.** Так как  $\lambda t = 10^{-8} \cdot 10^4 = 10^{-4} < 0,1$ , то пользуемся приближенной зависимостью  $P(t) = 1 - \lambda t = 1 - 10^{-4} = 0,9999$ .

Плотность распределения (в общем случае)

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (8.9)$$

Значения вероятности безотказной работы определяются в зависимости от приближенного равенства

$$\lambda(t) \approx \frac{t}{T}$$

Значения  $\lambda(t)t$  и  $P(t)$  можно сопоставить следующим образом:

$\lambda(t)t$ .....	1	0,1	0,01	0,001	0,0001
$P(t)$ .....	0,368	0,9	0,99	0,999	0,9999.

Так как при  $t/T = 1$  вероятность  $P(t) \approx 0,37$ , то  $1 - 0,37 = 63\%$  отказов возникает за время  $t < T$ , а оставшиеся  $37\%$  позднее. Из приведенных значений следует, что для обеспечения требуемой вероятности безотказной работы  $0,9$  или  $0,99$  можно использовать только малую долю среднего срока службы (соответственно  $0,1$  и  $0,01$ ).

14. Рассчитать вероятность отказа системы.

При  $n = 2$  выражение (8.5) преобразуется к виду

$$PA = P1 + P2 - P1 \cdot P2, \quad (8.10)$$

а при  $n = 3$  то же выражение (8.5) принимает вид

$$PA = P1 + P2 + P3 - P1 \cdot P2 - P2 \cdot P3 - P3 \cdot P1 + P1 \cdot P2 \cdot P3. \quad (8.11)$$

Вообще говоря, во всех случаях следует отдавать предпочтение формуле (8.5), чтобы избежать ошибок при вычислениях.

Система может работать в разных режимах. Это приводит к изменению нагрузки и интенсивности отказов, т. е. интенсивность отказов равна  $\lambda_1$  за время  $t_1$  и  $\lambda_2$  за время  $t_2$  и, согласно теореме умножения вероятностей,

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}. \quad (8.12)$$

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} = 1 - \exp(-\lambda_1 t_1 - \lambda_2 t_2).$$

В общем случае, если работа изделия происходит при разных режимах и, следовательно, интенсивностях отказов  $\lambda_i$ , то

$$P(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i\right). \quad (8.13)$$

Необходимо учитывать, что каждый элемент системы имеет свой срок службы и что интенсивность нагрузки на каждый элемент различна.

Для определения на основании опытов интенсивности отказов оценивают среднюю наработку до отказа

$$T_1 \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \sum t_i, \quad (8.14)$$

где  $N$  – общее число наблюдений.

Тогда  $\lambda = \frac{1}{\bar{t}}$ .

Для системы

$$P_{CT}(t) = e^{-\sum \lambda_i t}. \quad (8.15)$$

Если  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$ , то

$$P_{CT}(t) = e^{-n \lambda t}. \quad (8.16)$$

Таким образом, вероятность безотказной работы системы, состоящей из элементов с вероятностью безотказной работы по экспоненциальному закону, также подчиняется экспоненциальному закону, причем интенсивности отказов отдельных элементов складываются.

Используя экспоненциальный закон распределения, несложно определить среднее число изделий  $n$ , которые выйдут из строя к заданному моменту времени, и среднее число изделий  $N_p$ , которые останутся работоспособными.

При

$$\lambda t \leq 0,1$$

$$n \approx N \lambda t; N_p \approx N_1(1 - \lambda t). \quad (8.17)$$

### Контрольные вопросы

1. Достоинства «дерева неисправностей».
2. Недостатки «дерева неисправностей».
3. Дать определение блока описания событий.
4. Дать определение базового события.
5. Последовательность анализа надежности методом «дерева неисправностей».

## 9. РАСЧЕТ РИСКА

### 9.1. Количественная оценка риска

Одной из основных задач анализа риска является определение количественных характеристик опасности. Зная эти характеристики, можно на базе общих методов разработать эффективные частные методы обеспечения безопасности и оценивать существующие технические системы и объекты с точки зрения их безопасности для человека.

В главе 7 показано, что идентификация качественно определяет опасность. Для количественного определения опасности используется понятие *квантификация опасности*, означающее введение количественных характеристик для оценки сложных, качественно определяемых понятий.

Наиболее простое соотношение для определения величины риска

$$R = \frac{n}{N}, \quad (9.1)$$

где  $n$  – число неблагоприятных последствий, например смертельных исходов;  $N$  – возможное максимальное число неблагоприятных последствий за определенный отрезок времени.

Риск является неизбежным сопутствующим фактором любой деятельности. Цель управления риском – предотвращение или уменьшение травматизма, разрушений материальных объектов, потерь имущества и вредного воздействия на окружающую среду. Для управления риском его необходимо проанализировать и оценить количественно.

**Пример 9.1.** Определить риск гибели на производстве за год, если известно, что в РФ ежегодно погибает около  $n = 8000$  человек при численности работающих  $N = 72,5 \cdot 10^6$  человек.

$$R = \frac{n}{N} = \frac{8 \cdot 10^3}{72,5 \cdot 10^6} = 1,1 \cdot 10^{-4}.$$

С точки зрения общества в целом интересно сравнение полученной величины со степенью риска в обычных условиях человеческой жизни для того, чтобы получить представление о приемлемом уровне риска и иметь основу для принятия соответствующих решений.

## **9.2. Определение величины риска сокращения продолжительности жизни от воздействия радиоактивного загрязнения**

Радиоактивное загрязнение местности отрицательно влияет на здоровье проживающих в ней людей. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) на основе изучения обширных научных данных допускает, что при получении человеком сверхнормативного уровня дозы облучения в 0,01 Зв (1 бэр) сокращение продолжительности его жизни может составить 5 суток из 25 000, которые в среднем живет человек. Доза обусловлена внешним и внутренним облучением.

Сокращение продолжительности жизни при равной степени загрязнённости территории радионуклидами определяется в такой последовательности.

Первоначально рассчитывается доза облучения за всю жизнь после образования загрязнения по формуле, рекомендуемой службой ООН:

$$D = 2,7 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot П, \quad (9.2)$$

где  $П$  – плотность загрязнения местности радионуклидами, Бк/м<sup>2</sup>;  $K$  – коэффициент, величина которого зависит от типа почв, преобладающих в регионе проживания.

Тип почвы определяет интенсивность миграции радионуклидов в растительные и мясомолочные продукты питания, например, для песчаных почв  $K = 0,8$ , для черноземных  $K = 0,2$ .

Затем определяется сокращение продолжительности жизни (СПЖ), связанное с дозой облучения:

$$СПЖ = 500 \cdot D, \quad (9.3)$$

где  $СПЖ$  определяется в сутках.

Величина риска потерь за жизнь

$$R = 4 \cdot 10^{-5} \cdot СПЖ, \quad (9.4)$$

Выборка  $R^{-1}$  в данном случае приобретает смысл числа дней, по истечении которых теряется один день на протяжении жизни в 25 000 дней.

### **9.3. Определение величины риска заболевания профессиональной вибрационной болезнью**

В результате воздействия производственной вибрации на человека возникают нервно-сосудистые расстройства, поражения костно-суставной и других систем человека.

Патологические отклонения в организме, вызываемые вибрацией, называют вибрационной болезнью. Она имеет две основные формы: периферийную, возникающую от воздействия локальной вибрации, и церебральную – от воздействия общей вибрации.

Вибрационная болезнь занимает ведущее место в структуре профессиональных заболеваний для таких профессий, как шахтер, формовщик, обрубщик литья, слесарь механосборочных работ, клепальщик, оператор кузнечно-прессового оборудования и др., зачастую приводит к инвалидности работников и требует в дальнейшем значительных затрат на содержание и лечение пострадавших.

Для определения величины риска заболевания вибрационной болезнью проводились длительные регулярные исследования в условиях производства.

Так, на протяжении 25 лет наблюдалась группа рабочих из 40 человек. Каждый из них в течение 4 часов работал с одним и тем же типом инструмента, передающим локальную вибрацию на руки. При этом инструменты имели уровень виброускорения  $L_w$  в диапазоне от 120 до 160 дБ. Была поставлена задача – определить, через какое время проявятся симптомы васкулярных нарушений в организме человека, указывающие на начало развития вибрационной болезни, в зависимости от величины уровня виброускорения, генерируемого инструментом.

Эти нарушения, появляющиеся с течением времени, фиксировались при проявлении их у 10 % численности рабочих, далее в последовательности – 20, 30, 40 и 50 %. Это позволяет интерпретировать вероятность заболевания групп рабочих, при заданном виброускорении, как равную 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5.

Результат наблюдения представлен в табл. 9.1.

**Время воздействия вибрации  
до появления васкулярных нарушений, лет**

Уровень виброускорения $L_w$ , дБ	Число работающих, у которых проявились васкулярные нарушения, %				
	10	20	30	40	50
120	32,5	48,5	59,9	69,7	78,7
125	15,4	23,0	28,4	33,2	37,5
135	5,8	8,6	10,7	12,4	14,1
140	2,7	4,1	5,1	5,9	6,7
145	1,3	2,0	2,4	2,8	3,2
155	0,5	0,7	0,9	1,1	1,2
160	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

Полученные данные дают возможность определить величину заболевания вибрационной болезнью через соотношение

$$R = \frac{Q(t)}{t}, \quad (9.5)$$

где  $Q(t)$  – вероятность заболевания;  $t$  – время воздействия вибрации, по истечении которого появляются признаки вибрационной болезни, лет.

На основании анализа значений (табл. 9.1) риск заболевания от действия локальной вибрации можно представить формулой

$$R = 10^{(0,05 \cdot L_w - 8)} \cdot \sqrt{Q(t)}. \quad (9.6)$$

Риск заболевания от действия общей вибрации оценивается по формуле

$$R = 10^{(0,05 \cdot L_w - 8,9)} \cdot \sqrt{Q(t)}. \quad (9.7)$$

**Пример 9.2.** Определить риск и время заболевания работников бригады из 10 человек, использующих ручной инструмент с уровнем виброускорения  $L_w = 147$  дБ. Сколько человек заболеет за период профессиональной деятельности  $t = 45$  лет.

**Решение.** Риск заболевания от действия локальной вибрации можно определить по формуле

$$R = 10^{0,05 \cdot L_w - 8} \cdot \sqrt{Q(t)},$$

где  $Q(t)$  – вероятность заболевания.

Время заболевания определяем по формуле

$$t = \frac{Q(t)}{R}$$

1 работник: $R_1 = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{0,1} = 0,07$ ,	$t_1 = \frac{0,1}{0,07} = 1,43$ года;
2 работника: $R_2 = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{0,2} = 0,1$ ,	$t_2 = \frac{0,2}{0,01} = 2$ года;
3 работника: $R_3 = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{0,3} = 0,12$ ,	$t_3 = \frac{0,3}{0,12} = 2,5$ года;
4 работника: $R_4 = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{0,4} = 0,14$ ,	$t_4 = \frac{0,4}{0,14} = 2,86$ года;
5 работников: $R_5 = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{0,5} = 0,16$ ,	$t_5 = \frac{0,5}{0,16} = 3,125$ года;
6 работников: $R_6 = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{0,6} = 0,17$ ,	$t_6 = \frac{0,6}{0,17} = 3,5$ года;
7 работников: $R_7 = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{0,7} = 0,19$ ,	$t_7 = \frac{0,7}{0,19} = 3,68$ года;
8 работников: $R_8 = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{0,8} = 0,2$ ,	$t_8 = \frac{0,8}{0,2} = 4$ года;
9 работников: $R_9 = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{0,9} = 0,21$ ,	$t_9 = \frac{0,9}{0,21} = 4,29$ года;
10 работников: $R_{10} = 10^{0,05 \cdot 147 - 8} \cdot \sqrt{1} = 0,22$ ,	$t_{10} = \frac{1}{0,22} = 4,54$ года.

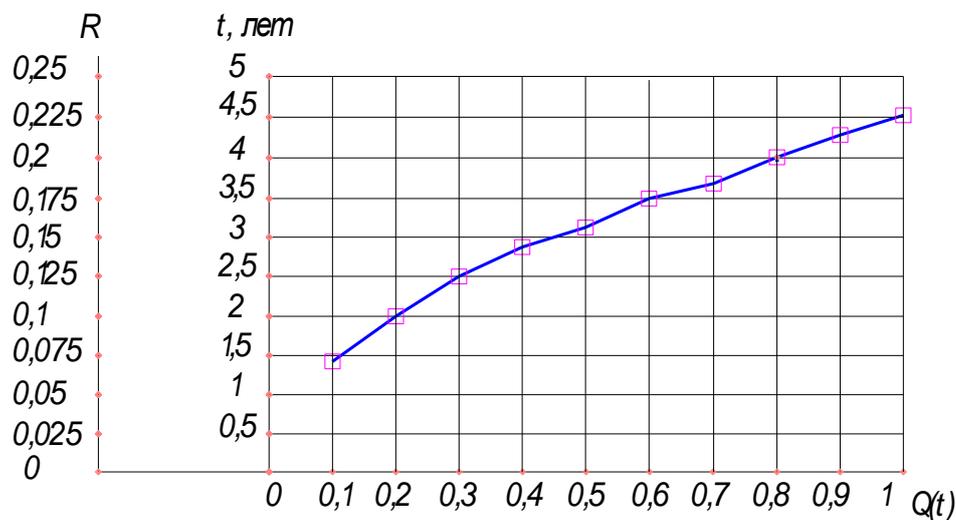


Рис. 9.1. Схема к расчету риска

Из графика видно, что за период профессиональной деятельности (45 лет) заболеют все работники. У всей бригады в составе 10 человек появятся признаки заболевания вибрационной болезнью уже через 4,54 года (примерно 4 года 6 месяцев). Риск заболевания одного из рабочих бригады составляет  $R = 0,07$  и соответствует времени  $t = 1,43$  года (примерно 1 год и 5 месяцев).

#### 9.4. Метод «дерева рисков»

Из названия стандарта «Управление надежностью. Анализ риска технологических систем» [16] следует, что анализ надежности неотделим от анализа риска.

Риском  $R$  называется количественная оценка опасности, вероятность проявления нежелательного для человека события.

Условия, при которых создаётся возможность проявления опасности, называются опасной ситуацией. Движущими силами возникновения опасности являются причины. Проявление причин и опасностей носит случайный характер и определяется вероятностными характеристиками.

Для оценки риска гибели человека при непрофессиональной деятельности пользуются понятием приемлемый риск, за максимальную величину которого принято значение  $R = 10^{-6}$  за год.

Согласно [54], профессиональная деятельность по риску гибели человека делится на четыре категории безопасности:

- безопасная ( $R < 10^{-4}$ );
  - относительно безопасная ( $R = 10^{-4} \dots 10^{-3}$ );
  - опасная ( $R$  составляет более  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$ );
  - особо опасная ( $R > 10^{-2}$ ).
- (9.8)

Для того чтобы выявить причины, влияющие на появление нежелательных для человека событий, используют методы системного анализа безопасности и элементы логики.

Любая опасность есть следствие некоторой причины (причин), которая, в свою очередь, является следствием другой причины и т. д. Причины и опасности образуют сложные цепные структуры, напоминающие по своей форме ветвящееся дерево, поэтому их называют «дерево причин», «дерево опасностей», «дерево событий», «дерево вероятностей». Построив такие схемы и имея статистические данные о вероятности проявления причин, можно определить вероятность возникновения опасности, риск поражения человека и найти степень безопасности данного вида деятельности. Рассмотрев структурную схему, можно выявить причины, на которые следует влиять предупредительными мерами, чтобы уменьшить риск гибели человека в данной системе.

Вероятность  $P(A)$  любого события  $A$  определяется неравенством

$$0 < P(A) < 1. \quad (9.9)$$

Если вероятность равняется 1, то это означает, что событие  $A$  достоверно, а если вероятность равняется 0, то событие невозможно.

При построении структурных схем используют уже знакомые символы событий (рис. 9.2) и логические символы или операции, называемые еще вентилями (рис. 9.3).

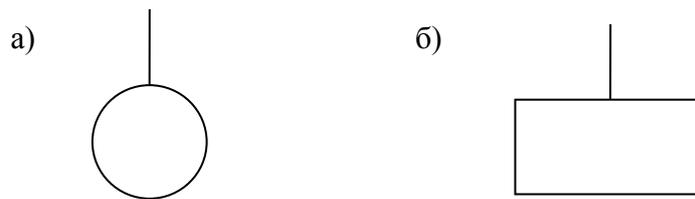


Рис. 9.2. Символы событий:

а – круг (○) – базовое событие или событие, которое не может быть подразделено (ГОСТ Р 51901.13–2005; ранее «исходное событие, обеспеченное достаточными данными (ИСОДД)»); б – прямоугольник (□) – блок описания события (ранее «событие, вводимое логическим элементом (СВЛЭ)»)

Логические символы «И», «ИЛИ» и другие используются при выполнении логических операций – «вентилей», подразумевающих определённые математические действия по вычислению вероятностей.

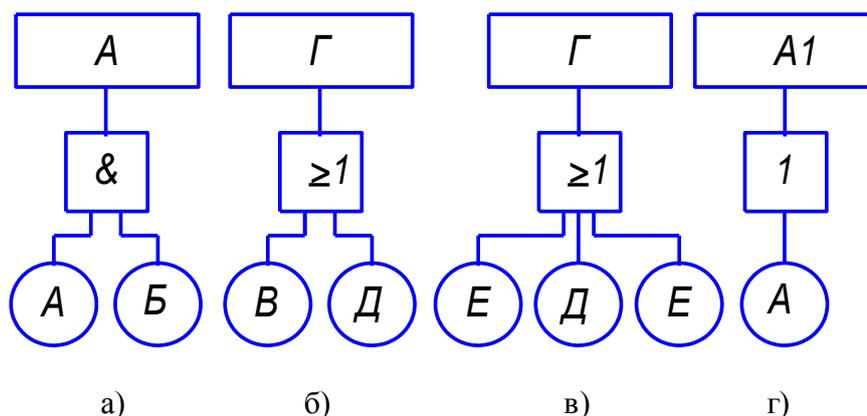


Рис. 9.3. Логические операции (вентили):

а – логическое произведение (вентиль «И»); б, в – логическая сумма (вентиль «ИЛИ»); г – знак, показывающий, что событие имеет два взаимоисключающих друг друга исхода (инвертор)

Вентиль «И» (рис. 9.3, а) указывает на то, что перед тем как произойдёт событие  $A$ , должны произойти оба события  $B$  и  $B$ .

Вероятность совершения события  $A$  равна произведению вероятностей  $B$  и  $B$ .

$$P(A) = P(B) \cdot P(B). \quad (9.10)$$

Вентиль «ИЛИ» указывает: чтобы произошло событие  $\Gamma$  (рис. 9.3, б), должно произойти событие  $D$  или  $E$  или оба события вместе.

$$P(\Gamma) = P(D) + P(E) - P(D \cdot E) = 1 - (1 - P(D))(1 - P(E)). \quad (9.11)$$

Для случая, изображённого на рис. 9.3, в

$$P(\Gamma) = P(D) + P(E) + P(\mathcal{J}) - P(D \cdot E) - P(E \cdot \mathcal{J}) - P(\mathcal{J} \cdot D) + P(D \cdot E \cdot \mathcal{J}) = 1 - (1 - P(D))(1 - P(E))(1 - P(\mathcal{J})). \quad (9.12)$$

Вентиль «инвертор» (рис. 9.3, г) указывает на то, что независимые события имеют два взаимоисключающих друг друга исхода, т. е. событие  $A1$  противоположно  $A$ .

$$P(A1) = 1 - P(A). \quad (9.13)$$

На рис. 9.4 показаны примеры применения комбинаций вентиля для анализа вероятностей событий.

$$P(A) = 1 - P(B) \cdot P(B);$$

$$R = P(A) = P(B) \cdot P(B)(1 - P(\Gamma))(1 - P(D))(1 - P(E)).$$

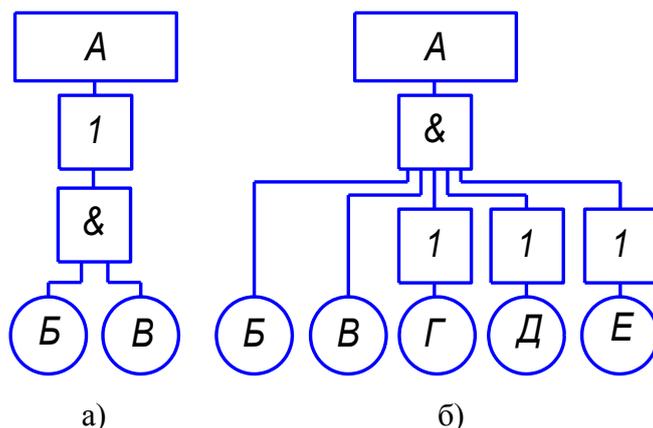


Рис. 9.4. Примеры использования вентиля:

а – вероятность отказа системы, где  $P(B)$ ,  $P(B)$  – вероятности безотказной работы элементов системы (вентили «инвертор», «И»); б – риск гибели человека  $R$  при воздействии опасного фактора, где  $P(B)$  – вероятность возникновения опасной ситуации;  $P(B)$  – вероятность воздействия опасных факторов с уровнями, смертельными для человека;  $P(\Gamma)$ ,  $P(D)$ ,  $P(E)$  – вероятности независимых событий, отражающих эффективность средств спасения людей (вентиль «И» для событий  $B$  и  $B$  и вентили «И», «инвертор» для событий  $\Gamma$ ,  $D$ ,  $E$ )

## 9.5. Метод рейтинговой оценки риска

Вопросы обеспечения безопасности человека в процессе труда являются наиболее сложными вопросами инженерной практики, зависящими от конкретных обстоятельств и условий того или иного производства, однако технические основы управления безопасностью условий труда достаточно типичны и состоят в идентификации (распознании) опасных и вредных производственных факторов, оценивании рисков, включая их анализ и управление рисками.

Для активного вхождения в процесс управления безопасностью труда необходима комплексная оценка риска (и тем самым безопасности). Методы комплексной оценки риска должны соответствовать требованиям решаемых задач и той исходной информации, которую можно получить для оценки. Такой подход к обеспечению безопасных условий труда на каждом рабочем месте был развит и получил известность как *risk assessment* – оценка риска (не путать с терминами «оценивание риска» – *risk evaluation* и «оценка величины риска» – *risk estimation*, подробнее см. [16]).

Указанный стандарт [16] трактует анализ риска как общую процедуру систематического использования информации для определения источников и значимости риска. Анализ риска обеспечивает базу для оценивания риска, мероприятий по снижению риска и для определения уровня приемлемого риска.

Идентификация опасностей, оценка рисков и управление рисками выполняются с целью планирования деятельности в области охраны труда, обоснования мероприятий по снижению рисков до приемлемого уровня.

На рис. 9.5 приведены основные задачи типичной идентификации опасностей и оценки рисков.

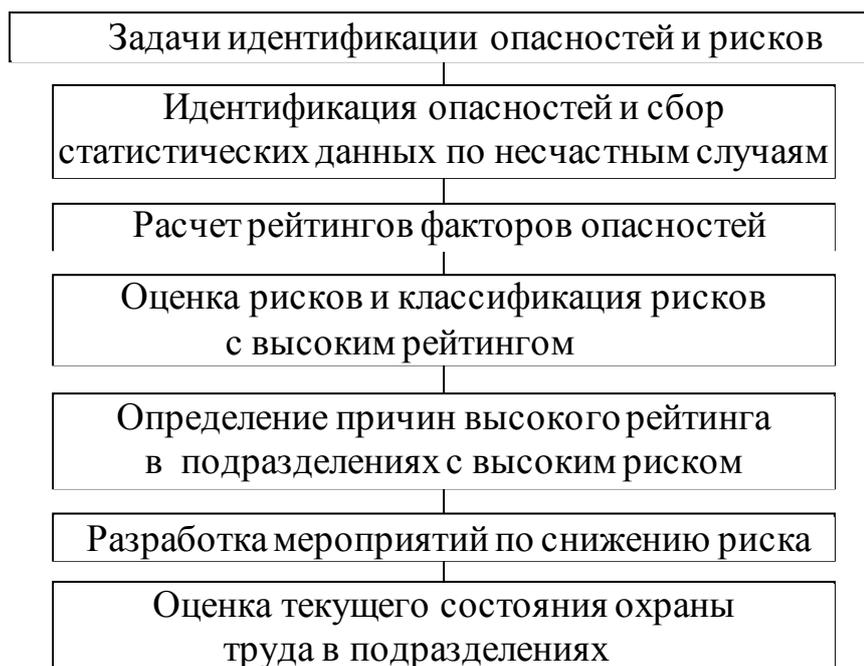


Рис. 9.5. Основные задачи идентификации опасностей

Независимо от применяемых приемов важно, чтобы в общем процессе идентификации опасности должное внимание было уделено тому, что человеческие и организационные ошибки являются существенными факторами во многих авариях

Порядок расчета рейтингов следующий. На каждый этап технологического процесса, на каждое рабочее место заполняется карта идентификации опасностей в соответствии с таблицей расчета рейтингов. Ниже приведены таблицы для расчета рейтингов.

Таблица 9.2

**Продолжительность воздействия опасного фактора  
(рейтинг ПВОФ)**

Продолжительность воздействия опасного фактора (час), за смену	Рейтинг ПВОФ
Менее 1	1
1	2
2	3
3	4
4	5
5	6
6	7
7	8
8	9
Более 8	10

Таблица 9.3

**Численность работников,  
подвергающихся опасности в смену (рейтинг ЧР)**

Численность работников	Рейтинг ЧР
1	1
2–3	2
4–5	3
6–10	4
11–20	5
21–50	6
51–100	7
101–200	8
Более 200	9

**Степень вероятности возникновения несчастного случая  
(рейтинг ВВ)**

Вероятность возникновения несчастного случая	Рейтинг ВВ
Маловероятно, подобных несчастных случаев в организации зарегистрировано не было	1
Маловероятно, последние три года подобных несчастных случаев не было	2
Средняя степень вероятности, подобных несчастных случаев в организации зарегистрировано не было	3
Средняя степень вероятности. В последние три года был зарегистрирован один (несколько) несчастных случаев	4
Средняя степень вероятности. В последние три года был зарегистрирован один (несколько) <b>тяжелых</b> несчастных случаев	5
Высокая степень вероятности, однако подобных несчастных случаев в организации зарегистрировано не было	6
Высокая степень вероятности. В последние три года был зарегистрирован один (несколько) несчастных случаев	7
Высокая степень вероятности. В последние три года был зарегистрирован один (несколько) <b>тяжелых</b> несчастных случаев	8
Вероятность возникновения несчастного случая очень высока, необходимо принятие срочных мер	9

Таблица 9.5

**Степень повреждений (рейтинг СП)**

Степень повреждений	Рейтинг СП
Дискомфорт работника на рабочем месте	1
Несчастный случай, не подлежащий обязательной регистрации (легкие ушибы, синяки и пр.)	2
Несчастный случай, подлежащий обязательной регистрации, с продолжительностью нетрудоспособности не более 5 дней	3
Несчастный случай, подлежащий обязательной регистрации, с продолжительностью нетрудоспособности более 5 дней	4
Тяжелый несчастный случай	5
Возможен летальный исход	9

Перечисляются опасности, которые потенциально могут привести к повреждению здоровья, например, поражение электрическим током при работе со станком, падение с высоты при штабелировании груза, падение приспособлений и инструмента.

Перечисляется оборудование, которое потенциально может привести к указанной травме.

Результирующий рейтинг опасности определяется как произведение следующих рейтингов: ПВОФ; ЧР; ВВ; СП.

Разрешается снизить рейтинг вероятности возникновения несчастного случая (ВВ) на один балл при отсутствии за последний год в организации зарегистрированных несчастных случаев по определенной опасности, а также при наличии в Плане управления рисками мероприятия по снижению указанного риска, которое было успешно выполнено. (Примечание: при этом рейтинг ВВ не может быть меньше 1 балла).

Если рейтинг ВВ определенной опасности равен 1, при этом указанная опасность не приводила к несчастному случаю последние три года, а рейтинг ВВ в предыдущем году был также равен 1, допускается удаление указанной опасности из карты идентификации опасностей.

Допускается снижение рейтинга степени повреждения здоровья (СП) на один балл при наличии в Плане управления рисками организационных мероприятий по снижению той или иной опасности, которые были выполнены, и при отсутствии за последний год в организации зарегистрированных несчастных случаев по указанной опасности. (Примечание: при этом рейтинг СП не может быть меньше 1 балла).

Не допускается снижение рейтингов опасностей в случае, если по ним не были запланированы мероприятия в Плане управления рисками или запланированные мероприятия не были выполнены.

Тем не менее, существует множество способов оценки риска, в частности известный метод оценки вероятности возникновения опасных ситуаций [54].

Для оценки риска гибели человека при непрофессиональной деятельности пользуются понятием «приемлемый риск», за наибольшую величину которого принято значение  $R = 10^{-6}$  за год.

## 9.6. Метод полуколичественной оценки риска [50]

Для оценки опасности технологических процессов и операций рекомендуется следующая классификация опасностей:

Таблица 9.6

### Классификация условий профессиональной деятельности

Класс	Условия профессиональной деятельности	Риск*	Риск**
I	Безопасные (оптимальные)	$< 0,7$	$< 10^{-4}$
II	Относительно безопасные (допустимые)	$0,7-0,8$	$10^{-4}-10^{-3}$
III	Опасные	$> 0,8$	$> 10^{-3}$

\* В соответствии с методом полуколичественной оценки риска.

\*\* В соответствии с методом, основанным на анализе статистических данных.

Математически риск ( $R$ ) можно выразить формулой

$$R = Q \cdot p,$$

где  $Q$  – вероятность происшествия;  $p$  – тяжесть события.

Тяжесть события ( $p$ ) определяют, исходя из анализа данных журнала регистрации несчастных случаев и актов формы Н-1.

При полуколичественной оценке рисков также используется таблица, согласно которой достаточно точно можно определить вероятность риска и тяжести последствий (табл. 9.7).

Таблица 9.7

### Полуколичественная оценка риска по 9-балльной системе

Вероятность $Q$	Степень тяжести $p$
9 – почти обязательно	9 – смерть
8 – очень возможно	8 – инвалидность 1-й группы
7 – возможно	7 – инвалидность 2-й группы
6 – больше чем случайность	6 – инвалидность 3-й группы
5 – случайность	5 – потеря работоспособности более чем на 4 недели
4 – меньше чем случайность	4 – потеря работоспособности менее чем на 4 недели
3 – маловероятно	3 – потеря работоспособности до 4 дней
2 – очень маловероятно	2 – небольшие ранения
1 – практически невозможно	1 – ранений нет

Максимальное количество баллов, которое можно получить при расчете риска по этому методу, – 81, поэтому полученные значения переводят в проценты, исходя из пропорции 81 балл = 100 %.

## 10. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙ И КАТАСТРОФ

### 10.1. Номенклатура аварий и катастроф

Понятие опасности дано в главе 7. Учитывая содержание главы 7, можно определить опасность несколько иначе.

*Опасность* – возможность нанесения вреда, имущественного, физического или морального ущерба личности, обществу, государству. Следует отметить, что опасность трансформируется в угрозу только в том случае, когда она может причинить ущерб конкретному объекту (субъекту).

*Чрезвычайная ситуация* (ЧС) – обстановка на определенной территории или акватории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей (ГОСТ Р 22.0.02–94 с изменениями).

Чрезвычайные ситуации различаются по характеру источника – природные, техногенные, биолого-социальные и военные, а также по масштабам – локальные, местные, территориальные, региональные, федеральные и трансграничные.\*

*Источником природной чрезвычайной ситуации* является опасное природное явление или процесс (ГОСТ Р 22.0.03–95). Это могут быть опасные геологические (землетрясения, вулканические извержения, горные удары, оползни, обвалы, сели, лавины), гидрологические (наводнения), метеорологические (сильные снегопады, ливни, град, ураганы, бури и смерчи) явления и процессы, а также природные пожары.

*Источником техногенной чрезвычайной ситуации* является опасное техногенное происшествие – авария на промышленном объекте или транспорте, пожары, взрывы или высвобождение различных видов энергии (ГОСТ Р 22.0.05–94).

*Источником биолого-социальной чрезвычайной ситуации* является особо опасная или широко распространенная инфекционная болезнь людей, сельскохозяйственных животных и растений (ГОСТ Р 22.0.04-95).

При классификации по масштабу (Положение о классификации утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 13.09.96 г. № 1094) (табл. 10.1) – к локальной относится такая чрезвычайная ситуация,

---

\* В объеме дисциплины рассматриваются техногенные ЧС. Более полные сведения даны для справок.

в результате которой пострадало не более 10 человек, либо нарушены условия жизнедеятельности не более 100 человек, либо материальный ущерб составляет не более 1 тыс. минимальных размеров оплаты труда и зона чрезвычайной ситуации не выходит за пределы территории объекта производственного или социального назначения.

*Авария* – опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определенной территории или акватории угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению зданий, сооружений, оборудования и транспортных средств, нарушению производственного или транспортного процесса, а также к нанесению ущерба окружающей природной среде.

Крупная авария, как правило с человеческими жертвами, является катастрофой (ГОСТ 22.0.05–94).

Приведенная далее классификация ЧС (табл. 10.1) позволяет разделить аварии и катастрофы по масштабам.

Таблица 10.1

### Классификация ЧС

Параметр	Класс ЧС					
	Локальная	Местная	Территориальная	Региональная	Федеральная	Трансграничная
Количество пострадавших, чел.	Не более 10	Свыше 10, но не более 50	Свыше 50, но не более 500	Свыше 50, но не более 500	Свыше 500	ЧС, поражающие факторы которой выходят за пределы РФ, либо ЧС, которая произошла за рубежом и затрагивает территорию РФ
Кол-во людей с нарушением условий жизнедеятельности	Не более 100	Свыше 100, но не более 300	Свыше 300, но не более 500	Свыше 500, но не более 1000	Свыше 1000	
Ущерб, МРОТ* тыс.	Не более 1	Свыше 1, но не более 5	Свыше 5, но не более 500	Свыше 500, но не более 5000	Свыше 5000	
Размер зоны	Объект	Насел. пункт, город, район	Субъект РФ	2 субъекта РФ	Более 2 субъектов РФ	

\* Минимальный размер оплаты труда.

Соответственно с ростом масштаба чрезвычайной ситуации увеличиваются показатели по числу пострадавших, объему материального ущерба и масштабу последствий.

Наиболее масштабной чрезвычайной ситуацией является трансграничная, поражающие факторы которой выходят за пределы Российской Федерации, ли-

бо чрезвычайная ситуация произошла за рубежом и затрагивает территорию нашей страны.

Все технические системы потенциально опасны, так как в них происходят процессы (явления) и содержатся объекты, способные в определенных условиях нанести ущерб (вред) здоровью человека и даже лишить его жизни. Данные процессы и объекты, действующие на организм человека непосредственно или косвенно, принято называть опасными и вредными факторами. Эти факторы действуют во внешне определенной области пространства, которую называют опасной зоной.

Пребывание человека в опасной зоне и нарушение им правил безопасности может привести к несчастным случаям, т. е. травмам, авариям, катастрофам. Опасность может быть оценена количественно, например величиной риска.

Понятие риска введено в главе 7. Величина риска и обратная величина – уровень безопасности – зависят от конкретных условий и обстоятельств, в которых протекает жизнь и деятельность человека, а также от его психофизиологических свойств, определяющих его поведение в опасной зоне. Риск в производственной среде определяется, прежде всего, техническими факторами: устойчивостью работы машин, оборудования, инструментов, приспособлений, а также методами технологии и организации производства, условиями микроклимата на рабочем месте. Именно эти факторы при неблагоприятном стечении обстоятельств становятся для работников вредными и опасными, приводящими к травмам, заболеваниям, летальному исходу.

## **10.2. Статистика аварий и катастроф**

Статистика [лат. status – состояние] – 1) наука, обрабатывающая и изучающая количественные показатели развития общественного производства и общества, их соотношения и изменения; 2) количественный учет массовых явлений [58].

Статистика как процесс ведения количественного учета массовых явлений является содержанием и результатом действия системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Согласно [15], *мониторинг окружающей среды* определяется как «система наблюдений и контроля, производимых регулярно, по определенной программе для оценки состояния окружающей среды, анализа происходящих в ней процессов и своевременного выявления тенденций ее изменения».

На федеральном уровне система мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций введена распоряжением Президента Российской Федерации от 23 марта 2000 г. № 86–рп.

В 2000 г. специалистами МЧС России разработаны «Методические рекомендации по созданию региональных и территориальных центров мониторинга, лабораторного контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Издан приказ Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 12.11.2001 г. № 483 «Об утверждении Положения о системе мониторинга, лабораторного контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

В 2007 г. в Омской области разработано «Положение о территориальной системе мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций Омской области».

Главными целями мониторинга, лабораторного контроля и прогнозирования ЧС являются:

- контроль состояния природных и техногенных источников ЧС;
- заблаговременное предсказание параметров ЧС и их последствий.

Основными задачами мониторинга, лабораторного контроля и прогнозирования ЧС являются:

- сбор, обработка и анализ информации о состоянии природных и техногенных источников ЧС;
- лабораторный контроль состояния окружающей среды;
- прогнозирование места, времени и параметров источников ЧС;
- прогнозирование места, времени, параметров и сценариев развития ЧС;
- прогнозирование видов и параметров последствий ЧС;
- расчет сил и средств, необходимых для предотвращения, локализации и ликвидации последствий ЧС.

Публикуются статистические данные об авариях и катастрофах федерального значения в государственных докладах МЧС России о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [20], [21] и др., где приводятся данные о чрезвычайных ситуациях предыдущего периода, об оценке опасности чрезвычайных ситуаций, о мероприятиях по предупреждению возникновения и развития чрезвычайных ситуаций, о мероприятиях по снижению потерь населения и размеров ущерба экономике в чрезвычайных ситуациях, о совершенствовании приоритетных направлений деятельности РСЧС и т. д.

Статистические данные об авариях и катастрофах регионального уровня приведены, например, в [51].

### 10.3. Причины аварийности на производстве

Развитие техники и технологии, направленное на повышение материального уровня жизни населения, одновременно ведет и к появлению тех или иных видов опасностей, как для здоровья населения, так и для состояния окружающей человека среды. На устранение этих видов опасности техногенного происхождения необходимо расходовать определенную долю материальных ресурсов общества, которые всегда ограничены. Затраты на создание и эксплуатацию технических систем, повышающих безопасность промышленности, отвлекают средства из отраслей производства товаров, поднимающих материальный уровень жизни населения и качество жизни. Чем больше тратится средств на технические системы безопасности, тем меньше остается их на борьбу с болезнями, на производство товаров и услуг, которые делают жизнь более полной. В настоящее время, когда затраты на обеспечение безопасности промышленности составляют значительную долю материальных ресурсов общества, важное значение приобретает проблема оптимизации этих затрат. Известно, что повышение уровня защищенности объектов от аварий и катастроф на один порядок требует больших усилий в научно-технической сфере и существенных затрат, сопоставимых с 10–20 % стоимости проекта.

В последние десятилетия в России и во всем мире проявилась отрицательная тенденция увеличения потерь от ЧС. Одной из причин этого является направленность государственной политики в области обеспечения безопасности населения и объектов хозяйства в основном на ликвидацию последствий ЧС, а не на их профилактику. Необходимость экономии расходов государства потребовала переоценки представлений о сложившемся (как правило, стихийно) соотношении затрат на превентивные меры по снижению рисков ЧС и на ликвидацию их последствий. Доля затрат на предупредительные меры защиты, осуществляемые на всех уровнях, должна возрастать. Целесообразность проведения мер защиты должна быть обоснована с учётом экономических (в условиях жестких финансовых ограничений) и социальных факторов.

Общим признаком аварий и ЧС на производстве является то, что им предшествует появление ряда событий, составляющих причинную цепь.

Наиболее типичной причинной цепью оказалась последовательность событий-предпосылок следующего вида:

- а) ошибка человека, и/или отказ технологического оборудования, и/или неблагоприятное внешнее воздействие;
- б) появление опасного фактора в неожиданном месте и/или не вовремя;

в) неисправность либо отсутствие средств защиты и/или неточные действия персонала либо посторонних лиц в этой ситуации;

г) воздействие опасных производственных факторов на незащищенные элементы технологического оборудования, людей, окружающую их среду.

Из всего количества причин происшествий 70 % зависит и 30 % не зависит от работающих, причем из 70 % ошибки исполнителей составляют 50 %; 25 % приходится на долю других участников работ. Оставшиеся 25 % аварий вызваны недостатками техники и технологии.

Обеспечение безопасности всегда было и остается одним из важных аспектов деятельности людей. Полная безопасность не может быть гарантирована никому, независимо от образа жизни. Прямой и косвенный ущерб для национальной экономики, связанный с техногенными авариями и хроническими заболеваниями, вызванными загрязнением окружающей среды, составляет 5–6 % от валового национального продукта России. Такой ущерб оказывается сопоставимым с планируемым приростом ВВП. Это делает проблему повышения защищенности объектов инфраструктуры одной из приоритетных.

Масштаб аварий в промышленности обусловлен не природой, а человеком и определяется:

– подходом к обеспечению безопасности и тенденциями развития производства;

– интенсификацией, связанной с ростом технологических параметров (температуры, давления, энергоемкости, содержания опасных веществ), проявляющейся в постоянном возрастании мощности единичных объектов (блоков, аппаратов, установок и т. д.);

– комплексной переработкой сырья, ведущей к концентрации на единой площадке различных производств и опасностей разной природы, увеличению размеров промышленных комплексов;

– обновлением технологий, обостряющих противоречия между темпами научно-технического прогресса и задачами по управлению новой техникой, а также навыками и профессиональными качествами персонала.

Управление системой, наряду с принятием решения, подразумевает разрешение возникающих технических и технологических проблем, включая диагностику состояния системы, вероятность нестандартных ситуаций, их оценку, установление приоритетов действий и их планирование. Совершенствование техники приводит не только к облегчению труда и повышению его эффективности, но иногда – к повышенным нервно-эмоциональным и психическим нагрузкам.

Применение современных технологий, в процессе реализации которых человеку приходится работать на пределе своих физических и психических возможностей, в условиях воздействия «агрессивной среды», недостатка (избытка) информации и времени, способствует увеличению вероятности ошибок (рискованных действий) в системе «человек – машина».

Повышение надежности (безопасности) в этой системе на современном этапе развития инженерной психологии, эргономики и других дисциплин, тесно связанных между собой в системе научных знаний о человеке, достигается на основе реализации антропоцентрического подхода – «от человека к технике».

Согласно этому подходу, повышение надежности системы «человек – машина», следствием которого являются рост результативности труда и сохранения состояния здоровья, реально лишь при условии максимального учета и согласования психофизиологических возможностей и ограничений человека с характеристиками технических средств на этапах их конструирования, создания и эксплуатации.

Решения, принимаемые в результате прогнозирования повторяемости аварий и катастроф, основываются на использовании ряда принципов.

В соответствии с *принципом обоснования*, меры защиты реализуются, если предотвращенный, благодаря принятым мерам, ущерб превышает затраты на осуществление этих мер.

*Принцип оптимизации* состоит в поддержании на возможно более низком уровне, с учетом экономических и социальных факторов, величин внешних воздействий и числа лиц, подвергающихся воздействию в любых видах деятельности. Практически это выражается в рациональном выборе объема мер защиты: из условия максимума отношения предотвращенного ущерба к затратам на осуществление мер защиты.

В качестве мер защиты могут рассматриваться: предупреждение аварийных ситуаций и предупреждение (снижение силы) некоторых опасных природных явлений; повышение защищенности и стойкости потенциально опасных объектов, оснащение их системами защиты и повышение надежности этих систем; введение дополнительных физических барьеров; снижение возможного ущерба от катастроф (снижение потенциала опасности на объекте, отселение людей или перемещение потенциально опасных объектов; подготовка персонала и населения к принятию адекватных решений при возникновении ЧС; подготовка сил и средств к ликвидации последствий аварий) и др.

Частным случаем принципа оптимизации является *принцип избирательности* – в первую очередь реализуются те меры, которые приводят к наибольшему повышению безопасности при одинаковых затратах.

*Принцип достаточности* – объём принимаемых мер защиты должен обеспечивать приемлемый уровень безопасности. Исходя из этого условия проводится нормирование воздействующих на человека негативных факторов. В частности, устанавливаются пределы доз облучения, предельно допустимые концентрации и т. д.

Следует иметь в виду, что целевой функцией при принятии решения конкретным человеком (и государством, действующим в его интересах) является уровень жизни, включающий не только безопасность человека, но и качество его жизни, поэтому качество жизни и риск взаимосвязаны. Для повышения качества жизни человек (и общество в целом) часто идет на некоторое увеличение риска. В результате для социально-экономических условий каждой страны стихийно устанавливается рациональное (обеспечивающее максимальный уровень жизни) равновесие между безопасностью и качеством жизни. Поэтому в тех случаях, когда речь идет о технологиях, сулящих значительную выгоду, но при этом риск для отдельных категории граждан превышает приемлемую величину, действует принцип оправданного риска. В соответствии с этим принципом польза для общества должна превышать возможный ущерб, а категориям рискующих сверх уровня, приемлемого в среднем для общества, должны предусматриваться социально-экономические компенсации.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое уровень безопасности и от чего он зависит?
2. Какими факторами определяется риск в производственной среде?
3. Назовите основные источники аварий и катастроф.
4. Какой ущерб национальной экономике наносят техногенные аварии и хронические заболевания, вызванные загрязнением окружающей среды?
5. Чем обусловлен масштаб аварий в промышленности?

### **10.4. Человеческий фактор как источник риска**

*Человеческий фактор* нередко выступает как причина разного рода поломок, аварий и катастроф, что подтверждается соответствующей статистикой в различных отраслях промышленности и транспорта (табл. 10.2). Известно, что ошибками человека обусловлено 80 % дефектов при разработке и создании сложных систем в промышленности; 40 % поломок в ракетной технике; 63,6 % аварий с участием судов (столкновения, затопления); 90 % дорожно-транспортных происшествий.

Статистические данные (табл. 10.2), свидетельствуют, что с человеческим фактором связано, в зависимости от обстоятельств, от 20 до 80 % разного рода нарушений в современном производстве и на транспорте.

Таблица 10.2

**Ошибки в системе проектирования, связанные с действиями людей на этапах проектирования, создания и эксплуатации технических средств**

Тип системы	Тип ошибки	Частота ошибок, %
Водный транспорт	Столкновения, затопления	63,6
Военно-воздушные силы	Отказы в системах управления	11,7–14,1
Воздушный транспорт	Летные происшествия	12–60
Другие сферы производства	Ошибки конструирования	2–43
Оборонная техника	Отказы систем управления	40
Ракетная техника	Неисправности оборудования, аварии	20–65
Ракетные двигатели	Неисправности	35
Реактивный воздушный транспорт	Неисправности оборудования	26–50
Электроника	Неправильное выполнение задания	23–45
Ядерное оружие	Дефекты производства	82

Анализ чрезвычайных ситуаций (ЧС) показывает, что роль человеческого фактора при возникновении аварий и катастроф значительна на всех стадиях жизненного цикла потенциально опасных объектов техногенной сферы – при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Ошибка – это неудача человека при выполнении предписанного действия (деятельности) в соответствующих пределах точности, последовательности и времени, которая может привести к повреждению оборудования или срыву выполнения задания. Типичные ошибки представляют собой:

- невыполнение определённого действия – ошибка «пропуска»;
- неправильное выполнение действия – ошибка «выполнения»;
- несвоевременное выполнение действия или нарушение последовательности – ошибка «последовательности» и «несвоевременности».

Все классификации ошибок могут быть разделены: а) на поведенческие, где ошибки рассматриваются вне зависимости от контекста профессиональной задачи; б) производственные, ориентированные на задачу, выполняемую человеком; в) комплексные, касающиеся системы «человек – машина» (СЧМ) в целом.

Причины ошибок в процессе деятельности могут быть разделены на три основные группы. К первой группе относят особенности выполняемой задачи, различные аспекты перерабатываемой человеком информации (объем, модальность, степень неопределенности и пр.). Эти причины объективны, обусловлены спецификой задачи и редко подлежат изменению.

Во вторую группу включены особенности работающего, его функциональное состояние (степень активации центральной нервной системы, утомление), психологические характеристики, например мотивация, сопротивление стрессу и т. д. Эти причины обусловлены как спецификой задачи, так и индивидуально-психологическими особенностями личности работающего.

В третью группу причин ошибочных действий работающего в СЧМ объединяют неблагоприятные условия внешней среды (шум, вибрация, освещенность, температура и другие показатели микроклимата, режим труда и пр.).

Утомление – одна из наиболее распространенных причин ошибочных действий человека в производственной деятельности. Определяющим признаком развивающегося утомления является временное снижение работоспособности, которое компенсируется во время отдыха или во время сна.

Ощущая усталость, человек снижает темп работы, у него развиваются отрицательные реакции, ослабевают внимание, память и самоконтроль, усиливается внушаемость, нарушается интеллектуальная деятельность. Усталость – один из самых ранних признаков наступающего утомления.

В реальных производственных условиях часто встречаемся с таким явлением, как десинхроз (болезненное состояние, обусловленное резким рассогласованием жизненных функций организма). Обязательный признак этого состояния – уменьшение работоспособности, проявляющееся в снижении производительности труда, ошибочных действиях, сбоях и срывах. В ночные смены резко возрастает число случаев производственного травматизма. Переход рабочих с дневных смен на ночные приводит к существенному увеличению профессиональной заболеваемости.

Мотивация занимает ведущее место в структуре личности, используется для объяснения движущих сил поведения и деятельности. В содержании мотива можно выделить нечто специфическое, индивидуально-неповторимое, определяемое конкретной уникальной ситуацией, и нечто устойчивое, обусловленное структурой личности.

Влияние личностных качеств на возникновение ошибок неоднозначно. Склонность к повышенной реактивности является характерной особенностью у людей типа *A* (экстраверты). Они отличаются чрезмерной напористостью в общении, раздражительностью, тенденцией к выполнению нескольких заданий одновременно и к планированию несоизмеримого с возможностями человека объема работ. Люди типа *B* (интроверты) уравновешенны, стремятся не вступать в противоречия с окружающими, осторожны в выборе рабочих нагрузок, менее энергичны и целеустремленны.

Роль личностного фактора в условиях современного производства может быть положительной при правильном учете особенностей данной профессиональной среды. Индивидуальные психологические особенности личности определяют тип, но не число совершаемых рабочими ошибок.

Влияние опыта и возраста работающих на качество деятельности неоднозначно. Отличительной чертой опытных рабочих является наличие стереотипов поведения. При смене условий работы сформированные стратегии становятся существенным тормозом на пути овладения навыками. В этом случае преимущество у молодых. Возраст снижает психомоторные и когнитивные возможности человека. Однако, если деятельность не сопряжена с частой сменой условий труда, эффективность и безопасность работы пожилых не ниже, чем у молодых. Это объясняется выработкой стратегий, качественной подготовкой к деятельности, экономичностью движений.

С учетом практических потребностей предприятия еще в процессе проектирования закладывается «правомерный» риск при выполнении технологического процесса, при этом предусматривается строгое соответствие операции руководящим документам, правилам и инструкциям по безопасности.

«Правомерный» риск обусловлен тем, что во многих случаях определенная цель производства не может быть достигнута обычными действиями. В силу объективных и субъективных условий производства, психологических особенностей работающих нарушаются нормативные требования, технология, что в общем виде определяется термином «неправомерный» риск.

В структуре неправильных поступков выделяются две основные группы: рискованные действия в нормативных и критических ситуациях. Ненорматив-

ная ситуация вызывает чрезмерное психологическое напряжение человека, заставляет его действовать быстро. В результате таких действий может произойти отказ оборудования или устройства.

### **Контрольные вопросы**

1. Классификация ошибок в процессе деятельности.
2. Причины ошибок.
3. Роль мотивации в деятельности работающего.
4. Как влияют личностные качества на возникновение ошибок?
5. Объясните смысл термина «правомерный» риск.
6. Объясните смысл термина «неправомерный» риск.

### **10.5. Факторы производственной среды и их влияние на надежность системы «человек – машина»**

На здоровье человека, его жизнеспособность и жизнедеятельность большое влияние оказывают опасные и вредные факторы. Опасный производственный фактор – фактор среды и трудового процесса, который может быть причиной травмы, острого заболевания или внезапного резкого ухудшения здоровья, а также смерти.

Вредный производственный фактор – фактор среды и трудового процесса, воздействие которого на работающего при определенных условиях (интенсивность, длительность и др.) может вызвать профессиональное заболевание, временное или стойкое снижение работоспособности, повысить частоту соматических и инфекционных заболеваний, привести к нарушению здоровья потомства.

Материальные носители вредных и опасных факторов – это объекты, которые формируют трудовой процесс и которые входят в него, а именно: факторы окружающей среды; предметы работы; средства работы (машины, станки, инструменты, сооружения, помещения, земля, пути, каналы и т. п.); продукты работы; технологии, операции, действия; природно-климатическая среда (гроза, наводнение, атмосферные осадки, солнечная активность, физические параметры атмосферы и т. д.); флора, фауна, люди.

Из воздействующих на человека факторов ведущими считаются следующие: несоответствие между рабочим пространством и работающим; неудовлетворительные условия внешней среды, недостаточная освещённость рабочего места, высокая температура окружающей среды, высокий уровень шума и т. д.

К настоящему времени установлены вредные для здоровья человека уровни освещенности, шума, вибрации, запыленности и т. д., но исследования далеки от завершения, недостаточно изучено влияние условий внешней среды непосредственно на эффективность деятельности.

В последние годы при проектировании (конструировании), изготовлении (строительстве) и эксплуатации технических систем в различных сферах деятельности чрезвычайно широко применяются персональные компьютеры и всевозможные компьютерные программы.

Работа программистов, операторов и других пользователей компьютеров связана с дополнительными вредными и опасными факторами. Отрицательное воздействие компьютера на человека является комплексным: утомление глаз вызывает мерцание экрана, блики, неоптимальное сочетание цветов в поле зрения; к усталости и возникновению болей в позвоночнике, шее, плечевых суставах приводит неподвижная, напряженная поза оператора, в течение длительного времени наблюдающего за экраном монитора; реальную угрозу представляет электромагнитное поле, которое создается при включении компьютера. Это поле может вызывать радиопомехи, т. е. мешать работе радио- и телеаппаратуры, что приводит к снижению надежности технической системы или системы управления, к увеличению риска возникновения аварийной ситуации в производственной среде. В целях обеспечения безопасности работы с компьютером разработаны и должны повсеместно применяться стандарты на мониторы, требования к помещениям для эксплуатации компьютеров и к организации и оборудованию рабочих мест.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение понятий «вредный производственный фактор», «опасный производственный фактор».
2. Влияние условий внешней среды на эффективность деятельности.
3. Вредные и опасные факторы при работе на компьютере.

## **10.6. Применение распределения Пуассона для оценки риска аварий**

Оценка степени риска поражения людей и нанесения ущерба при авариях связана с задачей прогнозирования показателей надежности и остаточного ресурса функционирующей системы. Наиболее важным вопросом является установление допустимых сроков дальнейшей эксплуатации индивидуального объ-

екта при конкретном значении риска аварии. Ответственность за соответствующие инженерные решения о мерах по снижению риска или о приостановке функционирования объекта лежит на комиссии, в состав которой должны входить специалисты-эксперты и представители административных органов.

Одним из основных показателей надежности объекта является вероятность  $P(t)$  безотказной работы на некотором временном интервале (функция надежности). Функция  $Q(t) = 1 - P(t)$ , дополняющая  $P(t)$  до единицы и характеризующая вероятность отказа, является функцией риска аварии – поражения людей и нанесения материального ущерба.

Для оценки риска применяют модели теории надежности. Среди них модели высоконадежных систем, для которых аварийные ситуации явление редкое, а также модели стареющих систем, качество которых в процессе эксплуатации ухудшается вследствие ползучести, различных видов усталости, износа и других видов повреждений.

Прогнозирование аварийных ситуаций возможно на основе элементарной статистики и дискретного распределения Пуассона, часто применяемого к редким событиям и природным явлениям.

Функцией риска аварии из-за отказа нормального функционирования объекта называют вероятность отказа:

$$H(t) = 1 - P'(t), \quad P'(t) = \exp(-\int \lambda(\xi) d\xi), \quad (10.1)$$

$$\lambda(t) = -P'(t) / P(t),$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы (функция надежности);  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов, равная вероятности того, что после безотказной работы до момента времени  $t$  авария произойдет в последующем малом отрезке времени.

Опыт показывает, что после небольшого начального периода эксплуатации (приработки) функция  $\lambda(t)$  длительный период достаточно стабильна, т. е.  $\lambda(t) = \text{const}$ . Влияние интенсивного старения за счет коррозионного износа, усталости и других факторов должно исключаться регламентированием допустимого срока службы.

Принимая для периода нормального (спокойного) функционирования  $\lambda(t) = \text{const}$ , из (10.1) получают экспоненциальное распределение

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (10.2)$$

причем  $\theta = 1/\lambda$  – математическое ожидание срока службы (ресурса) или средняя наработка на отказ. Функцию риска теперь можно записать в виде

$$H(t) = 1 - \exp(-t/\theta). \quad (10.3)$$

При функции надежности в виде (10.2) частота отказов в системе однотипных объектов (поток случайных событий) соответствует дискретному распределению Пуассона

$$Q(N, \lambda\tau) = \frac{(\lambda\tau)^N}{N!} \exp(-\lambda\tau), \quad N = 0, 1, 2, \dots, \lambda\tau > 0. \quad (10.4)$$

Согласно данной формуле, аварии на временном интервале  $\tau$  ( $t, t + \tau$ ) произойдут  $N$  раз с вероятностью  $Q(N, \lambda\tau)$ , а отсутствие аварийных ситуаций (отсутствие отказов) – с вероятностью

$$Q(0, \lambda\tau) = \exp(-\lambda\tau). \quad (10.5)$$

Вероятность того, что аварии произойдут  $n$  раз при  $n < N$  (т. е. менее  $N$  раз), определяется функцией распределения

$$Q_0(n < N) = \sum_{i=0}^{N-1} Q(i, \lambda\tau) = 1 - \varphi(N, \lambda\tau) \quad (10.6)$$

$$\varphi(N, \lambda\tau) = Q_0(n \geq N) = \sum_{i=1}^{\infty} Q(i, \lambda\tau).$$

Вероятность  $\bar{Q}$  возникновения хотя бы одной аварии представляет оценку риска аварий на объекте в период  $\tau$

$$\bar{Q} = 1 - Q(0, \lambda\tau) = 1 - \exp(-\lambda\tau). \quad (10.7)$$

Для математического ожидания  $N$ , дисперсии  $D$  и стандарта  $\sigma$  (среднеквадратического отклонения) имеет место равенство  $N = D = \sigma^2 = \lambda\tau$ , т. е. имеется возможность экспериментальной проверки правдоподобия гипотезы о применимости закона Пуассона к конкретному виду аварии по факту хотя бы приблизительного соблюдения равенства  $N = D$ .

Таким образом, прогнозирование аварийных ситуаций возможно на основе элементарной статистики. Такого рода данные представляют интерес при принятии решений о мерах по снижению степени риска аварий на объектах.

Значения вероятности аварий  $Q(N, \lambda\tau)$  для числа  $N \leq 5$  и риска возможной аварии  $\bar{Q}$  приведены в табл. 10.3 и на рис. 10.1.

Таблица 10.3

**Вероятность  $N$  аварий и оценка риска аварийности  $\bar{Q}$   
в зависимости от параметра  $\lambda\tau$ , согласно распределению Пуассона**

$N$	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
0	0,905	0,819	0,741	0,607	0,368	0,135	0,050	0,018	0,007
1	0,091	0,164	0,222	0,303	0,368				
2	0,0045	0,016	0,033	0,076	0,184	0,271			
3	0,0002	0,0011	0,0033	0,013	0,061	0,180	0,224		
4		0,0001	0,0003	0,0016	0,015	0,090	0,168	0,195	
5				0,0002	0,003	0,036	0,101	0,156	0,176
$\bar{Q}$	0,095	0,181	0,259	0,393	0,632	0,865	0,950	0,982	0,993

Закон Пуассона является частным (предельным) случаем биномиального распределения при большом числе маловероятных событий. В связи с этим формулу Пуассона называют законом редких явлений. На рис. 10.2 показано распределение Пуассона для нескольких значений  $\lambda\tau$ , из которого видно, что при больших значениях  $\lambda\tau$  ( $\lambda\tau \geq 10$ ) распределение приближается к нормальному распределению при  $\mu = \sigma^2 = \lambda\tau$

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (10.8)$$

Закон Пуассона широко используют на практике: в теории надежности, при проверке качества, при прогнозировании сейсмического риска и др. Закон Пуассона применим также к событиям (авариям), разбросанным на площадях. В этом случае параметр  $\lambda$  имеет смысл средней плотности, отнесенной не к временному интервалу, а к некоторой площади.

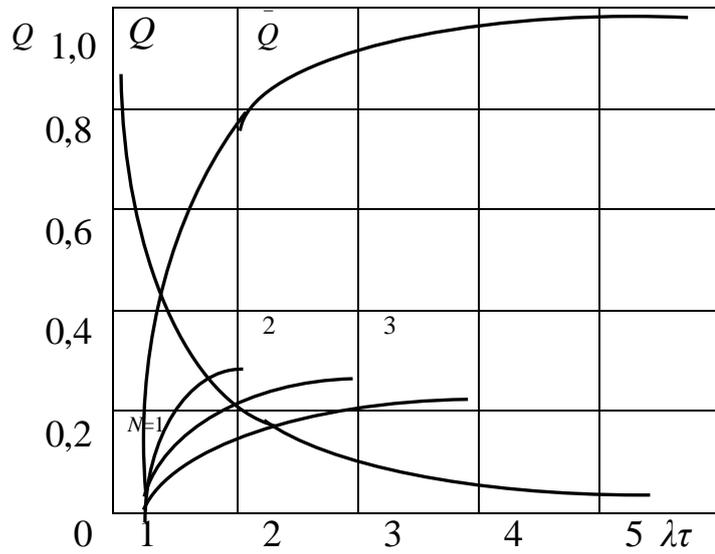


Рис. 10.1. Вероятность аварий и оценка риска  $\bar{Q}$  аварийности в зависимости от параметра  $\lambda\tau$

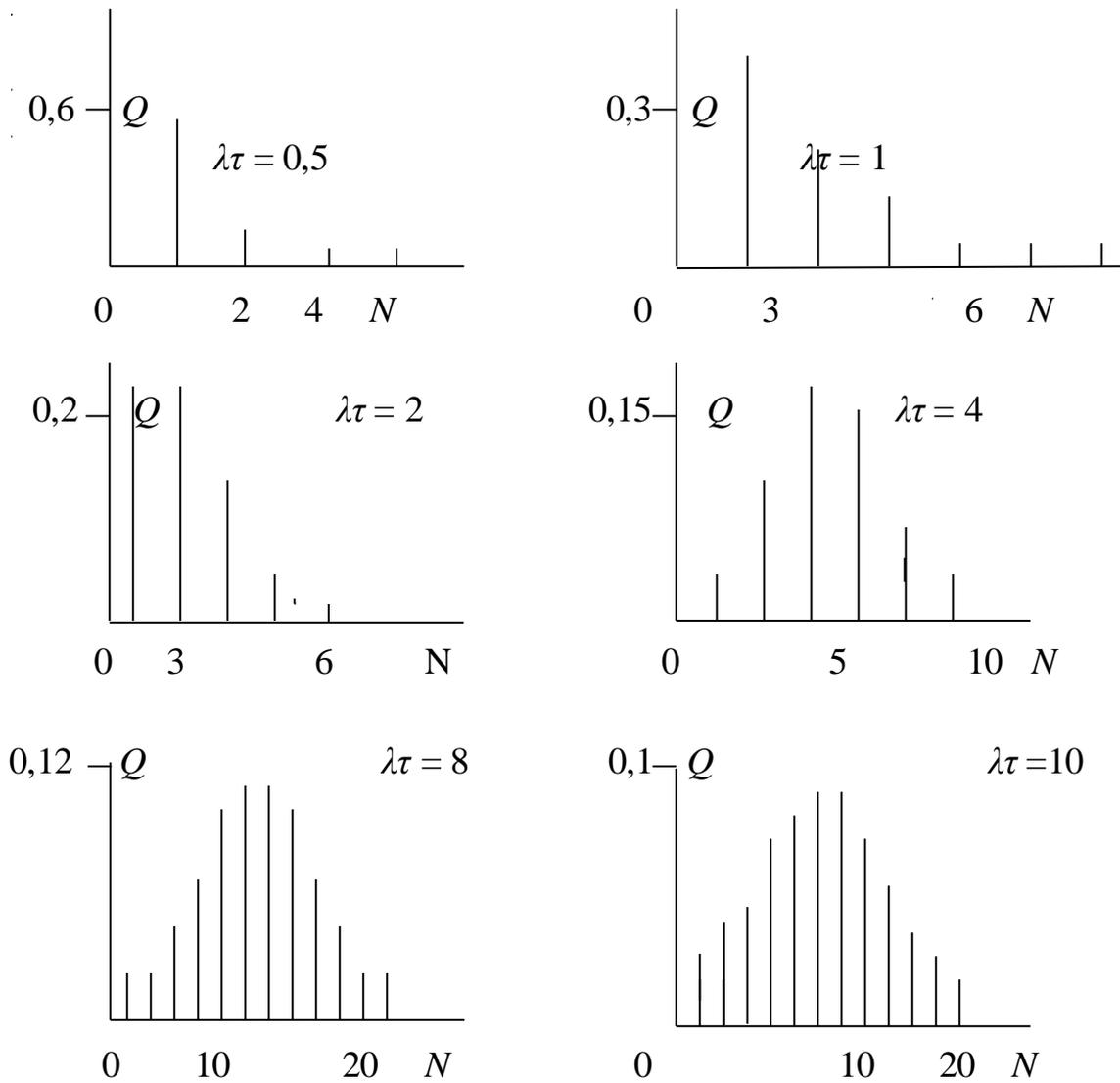


Рис. 10.2. Распределение Пуассона для шести значений  $\lambda\tau$

Известен пример исключительно хорошего согласия с распределением Пуассона реальной статистики падений самолетов-снарядов в южной части Лондона в период Второй мировой войны. Такое согласие установлено при подсчете числа  $k$  падений, приходящихся на каждый из  $N = 576$  одинаковых участков территории, каждый площадью  $S = 0,25$  км<sup>2</sup>. При общем числе снарядов  $T = 537$  число участков  $Nk$ , на которое приходилось по  $k$  падений (среднее число  $\lambda S = T/N = 0,9323$ ), дано в табл. 10.4 в сравнении со значениями вероятностей  $P(k; 0,9323)$ , подсчитанных по формуле Пуассона.

Таблица 10.4

**Сравнение статистики падения самолетов-снарядов  
с соответствующим распределением Пуассона**

Число падений $k$	0	1	2	3	4	5	$\geq 5$
Число участков $Nk$	299	211	93	35	7	–	1
$Q(0,9323)$	0,3936	0,3670	0,1711	0,0532	0,0124	0,0023	–
$576 \cdot Q(k; 0,9323)$	226,74	211,39	98,54	30,62	7,14	1,33	–

Оценку надежности производственных установок и различной аппаратуры, а также обслуживания персоналом можно провести с использованием биномиального распределения подсчетом вероятности частоты  $r$  успешных событий (например, пусков и т. п.) при их общем числе  $n$ . Доверительный интервал для фактической вероятности  $P_T$  определяется уравнением

$$\sum_{j=r}^n \binom{n}{j} P^j (1-P)^{n-j} = 1 - \alpha$$

где  $\binom{n}{j} = n!/[j!(n-j)!]$  – биномиальные коэффициенты;  $P$  – нижняя граница искомой надежности  $P_T$ ;  $\alpha$  – достоверность того, что фактическая вероятность  $P_T$  находится в интервале  $P \dots 1$ .

Значения вероятности  $P_T$  при достоверности  $\alpha = 0,8$  приведены в табл. 10.5 для трех значений  $n$ .

**Вероятность успешных (безаварийных) событий с достоверностью 0,8  
при различных значениях  $r$**

$n$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
10	0,083	0,240	0,418	0,619	0,851					
15	0,056	0,157	0,272	0,394	0,524	0,662	0,813			
20	0,041	0,117	0,201	0,291	0,384	0,481	0,582	0,686	0,798	0,922

Рассматривается альтернативный подход с привлечением модели, учитывающей некоторые физические процессы, в предположении, что авария на взрывоопасном объекте возникает в результате накопления элементарных повреждений  $y$  при достижении некоторого предельно допустимого износа  $M$ . Процесс накопления повреждений фиксируется функцией износа  $\eta(t)$ . Отказ наступает при условии  $\eta(t) \geq M$  и числе элементарных повреждений  $r = M/y$ .

Для объектов с высокой однородностью начального качества (обеспечивается жестким контролем качества материалов и технологии производства, что обычно реализуется при изготовлении труб, сосудов, резервуаров и газгольдеров) расчет вероятности отказа (аварии) возможен с использованием модели монотонно стареющих систем, т. е. с накапливающимися повреждениями, на основе гамма-распределения времени  $T$  функционирования

$$F(t) = \frac{\lambda^r T^{r-1} \exp(-\lambda T)}{\Gamma(r)},$$

где  $\Gamma(r)$  – гамма-функция;  $\lambda = y^{-1} dM \cdot [\eta(t)]/dt$  – скорость износа.

Для целых значений  $r$  гамма-функция  $\Gamma(r) = (r - 1)!$ , а функция распределения имеет вид

$$Q(N, \lambda t) = 1 - \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda T)^k}{k!} \exp(-\lambda T) =$$

$$= 1 - \exp(-\lambda T) \left[ 1 + \lambda T + (\lambda T)^2 / 2! + \dots + (\lambda T)^{r-1} / (r-1)! \right]. \quad (10.9)$$

При  $r = 1$  выражение (10.9) соответствует плотности экспоненциального распределения (мгновенный выход из строя при однократном повреждении).

## 10.7. Примеры оценки риска аварий

**Пример 10.1.** На объекте за 20 лет произошло 4 аварии, т. е. среднее число аварий равно  $\lambda = 4 / 20 = 0,2 \text{ лет}^{-1}$ . Тогда за период  $\tau = 2$  года две аварии ( $N = 2$ ) могут произойти с вероятностью  $Q[(2; 0,2 \cdot 2)] = 0,4^2 \exp(-0,4)/2! = 0,054$ , а одна авария – с вероятностью  $Q(1; 0,4) = 0,227$ .

Вероятность безаварийного функционирования объекта  $Q(0; \lambda\tau)$  в течение двух лет равна  $Q(0; 0,4) = \exp(-0,4) = 0,67$ , а в течение одного года  $Q(0; 0,2) = \exp(-0,2) = 0,82$ , т. е. риск аварийных ситуаций за двухлетний период составит  $1 - 0,67 = 0,33$ , а за один год –  $0,18$ .

**Пример 10.2.** Средняя скорость износа агрегата с взрывоопасным энергоносителем  $\lambda = 0,02 \text{ ч}^{-1}$ . Предельное число элементарных повреждений  $\tau = 6$ . Агрегат функционирует 3 ч в сутки. Определим риск аварий в течение недели.

За указанный срок время работы агрегата  $T = 7 \cdot 3 = 21 \text{ ч}$ ,  $\lambda T = 0,42$ . По формуле (10.9) оценка величины риска:

$$R(0,42) = 1 - \exp(-0,42)(1 + 0,42 + 0,42^2/2 + 0,42^3/6 + 0,42^4/24 + 0,42^5/120) = \\ = 5,33 \cdot 10^{-6}.$$

## 10.8. Примеры определения вероятности безотказной работы технической системы

Источником техногенной ЧС на промышленном объекте, как правило, бывает отказ технической системы или элемента системы, конструктивные ошибки.

Обычно неработоспособным называют состояние объекта, при котором нельзя эксплуатировать объект. Следует считать неработоспособным объект, когда он не может выполнять своё назначение по соображениям безопасности (например, обрыв одной пряди троса).

Количественный анализ риска включает в себя оценку многочисленных факторов, однако основой или началом анализа стоит считать количественную оценку отказа системы или объекта.

Количественная оценка отказов показателями надежности не может характеризовать риск отказа промышленного объекта в полной мере. Количественный анализ отказов не учитывает влияния человеческого фактора (трудо-вая и технологическая дисциплина, организация управления и т. д.). При количественной оценке риска, проводимой в рамках декларирования и экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО), важно соблюдать единство подходов при использовании основных показателей

риска аварии. Итоги декларирования промышленной безопасности ОПО показывают, что результаты анализа риска аварии представляются не всегда достаточно четко и определенно.

**Пример 10.3.** Выполняется количественная оценка аварии на ОПО. Аварии на ОПО обычно анализируют, рассматривая случайную величину потерь (ущербов)  $Y \geq 0$ . Потери  $Y$  разделяют на материальные –  $G$  (непрерывная случайная величина) и людские –  $N$  (дискретная случайная величина).

Дискретная случайная величина людских потерь  $N$  при аварии на ОПО может иметь значения  $0, n_1, n_2, \dots, n_k$ . Каждому из значений величины  $N$  соответствует некоторая вероятность  $p_0, p_1, p_2, \dots, p_k$ .

Закон распределения случайной величины записан в виде таблицы:

$n_i$	$Q$	$n_1$	$n_2$	$\dots n_s \dots$	$n_k$
$P_i$	$1 - \sum_{i=1}^k p_i$	$p_1$	$p_2$	$\dots p_s \dots$	$p_k$

$\sum_{i=0}^k p_i = 1$ , а  $p_{i=0} = 1 - \sum_{i=1}^k p_i$  есть вероятность безаварийной эксплуатации ОПО.

Исходные данные изображаются в виде многоугольника распределения. Пример многоугольника случайной величины  $N$  для типичного ОПО представлен на рис. 10.3.

Непрерывные случайные величины задаются функцией распределения  $F(y)$ , равной вероятности  $P$  того, что случайная величина  $Y$  примет значение меньше  $y$ :

$$F(y) = P(Y < y). \quad (10.10)$$

В практике анализа риска чаще используют характеристику случайной величины потерь  $\bar{F}(y)$ :

$$\bar{F}(y) = P(Y \geq y). \quad (10.11)$$

$$\bar{F}(y) = 1 - F(y). \quad (10.12)$$

$\bar{F}(y)$  – интегральная функция распределения потерь при аварии на ОПО ( $F/Y$  – кривая). Пример графического изображения интегральной функции распределения потерь персонала при аварии  $\bar{F}(n)$  ( $F/N$  – кривая) для многоугольника распределения, представленного на рис. 10.3, показан на рис. 10.4.

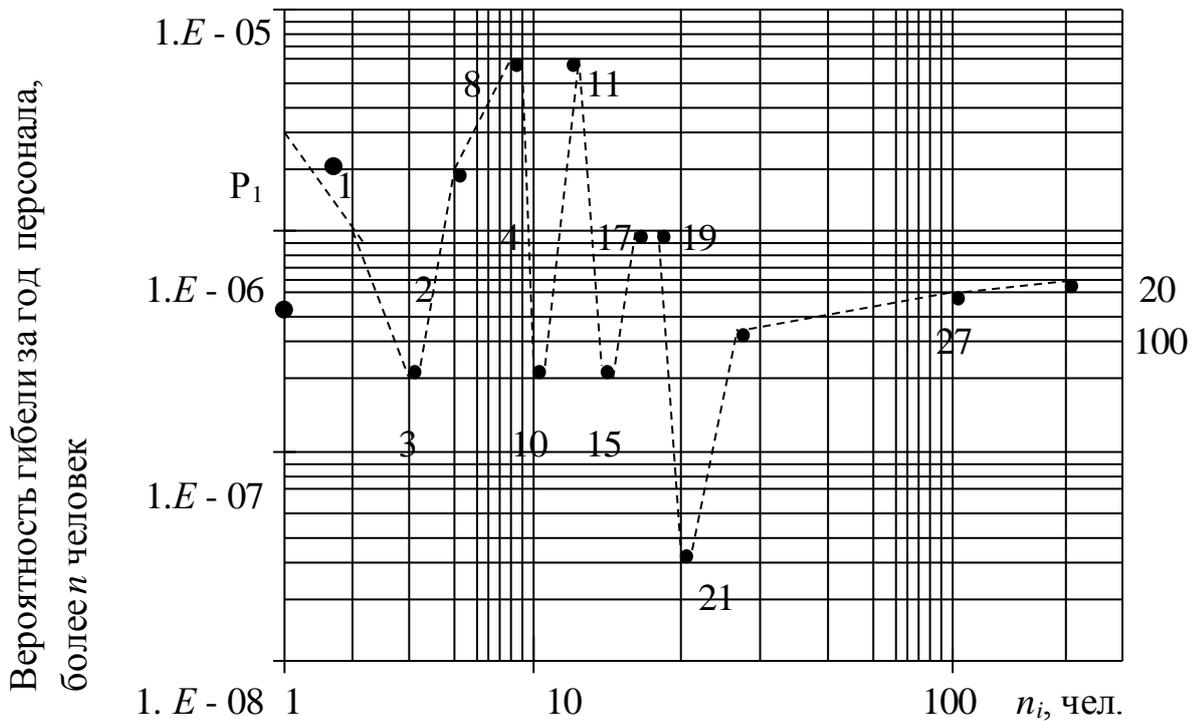


Рис. 10.3. Многоугольник распределения числа погибших при аварии на нефтеперекачивающей станции с резервуарным парком

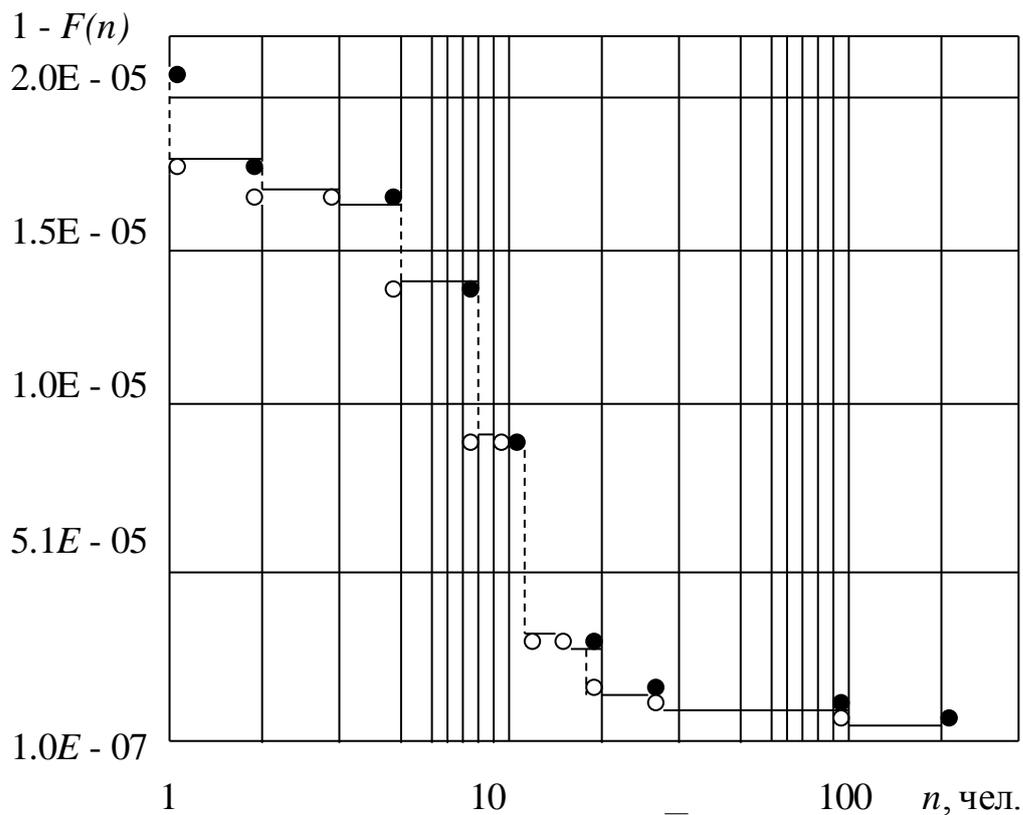


Рис. 10.4. Интегральная функция распределения  $\bar{F}(n)$  числа погибших при аварии на нефтеперекачивающей станции с резервуарным парком ( $F/N$ -кривая). В зависимости от вида потерь – людских или материальных – ее называют  $F/N$ -кривой (диаграммой) или  $F/G$ -кривой

Основные свойства интегральной функции распределения потерь  $\bar{F}(y)$  следующие:

1.  $\bar{F}(y_2) \leq \bar{F}(y_1)$ .

Интегральная функция распределения потерь  $\bar{F}(y)$  есть невозрастающая функция с неотрицательной областью определения своего аргумента  $y \in [0, +\infty)$ , т. е. при  $y_2 > y_1$ .

2.  $\bar{F}(+\infty) = 0$ .

На плюс бесконечности интегральная функция распределения потерь равна нулю.

3. При нулевом аргументе интегральная функция распределения потерь принимает значение, равное единице.

$$\bar{F}(0) = 1.$$

4. Интегральная функция распределения людских потерь  $\bar{F}(n)$  есть разрывная ступенчатая функция, скачки которой происходят в точках, соответствующих возможным значениям случайной величины  $N$ , и равны вероятностям этих значений. Сумма всех скачков  $\bar{F}(n)$  равна единице.

5.  $P(\alpha \leq Y < \beta) = \bar{F}(\alpha) - \bar{F}(\beta)$ .

Вероятность попадания случайной величины на заданный участок  $\alpha \leq Y < \beta$  ( $\alpha$  и  $\beta$  – границы участка) равна модулю приращения интегральной функции распределения  $\bar{F}(y)$  на этом участке.

При  $g = 1$  значение интегральной функции распределения потерь нефти  $\bar{F}(g)$ , например, для линейной части магистральных нефтепроводов равно вероятности за год аварии с разливом более 1 т нефти. Значение  $F/N$ -кривой при  $n = 1$  чел. равно вероятности несчастного случая со смертельным исходом, связанного с аварией на ОПО.

Необходимо отметить, что для события «отказ технического устройства» в теории надежности, например [64], в качестве характеристики используется дискретная случайная величина  $X$  или, в более общем случае, случайная величина  $T$  – момент времени наступления отказа, принимающая значения  $X = 1$  при наступлении отказа за определенное время или  $X = 0$ , если отказ не наступил.

Если объектом внимания является событие, относящееся к крупным нежелательным последствиям в таких сложных системах, как банкротство компании или авария на ОПО, то анализ проводится путем рассмотрения случайной величины потерь или ущербов  $Y \geq 0$  как результата деятельности. При этом в области промышленной безопасности  $Y \geq 0$  является случайной величиной потерь от аварии на ОПО, а применяемые согласно [19] определения количественных показателей риска аварии (индивидуальный, коллективный и социальный риски, ожидаемый ущерб) являются собственно характеристиками случайной величины потерь  $Y$  при аварии.

Несколько обособлено определение «потенциальный территориальный риск», характеризующее случайное событие как возникновение факторов, достаточных для поражения человека, и оцениваемое дискретной величиной  $D = 1$ , если за определенное время событие происходит, и  $D = 0$ , если не происходит.

Приводится формула (10.6) в развернутом виде для более удобного построения  $F/N$ -кривых.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k p_i = 1 - p_0, \quad 0 < y \leq y_1, \\ \bar{F}(y) = \sum_{i=s}^k p_i, \quad y_{s-1} < y \leq y_s. \\ \dots \quad \dots \\ P_k, \quad y_{k-1} < y < y_k, \\ 0, \quad y_k < y < \infty. \end{array} \right. \quad (10.13)$$

Из формул (10.11) и (10.13) следует, что никакие точки, обозначающие отдельные события, не могут лежать выше  $F/Y$ -кривой.

Функция плотности распределения (плотность вероятности) для непрерывной случайной величины материальных потерь при аварии  $G$ :

$$f(g) = F'(g) = -\bar{F}'(g). \quad (10.14)$$

Рассматриваются основные числовые характеристики случайных величин. Математическое ожидание, мода, медиана и дисперсия характеризуют положение и разброс значений случайной величины на числовой оси.

Математическое ожидание дискретной случайной величины  $N$  определяется как

$$R_{кол} = M[N] = \sum_{i=1}^k n_i p_i. \quad (10.15)$$

Если ввести в рассмотрение случайную величину числа рискующих попасть в аварию  $U$ , то можно записать общее выражение среднего группового индивидуального риска  $R_{инд}$  как математическое ожидание частного случайных величин  $N$  и  $U$ :

$$R_{инд} = M \left[ \frac{N}{U} \right] = M[N] \cdot M \left[ \frac{1}{U} \right] + K_{N/U}, \quad (10.16)$$

где  $K_{N/U}$  – корреляционный момент случайных величин  $N$  и  $1/U$ .

В частном случае при  $U = \text{const}$ :

$$R_{инд} = M \left[ \frac{N}{U \equiv \text{const}} \right] = \frac{1}{U} M[N] = \frac{R_{кол}}{u}, \quad (10.17)$$

где  $U$  – общее число людей, подвергающихся риску.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины  $G$  (ожидаемый ущерб) определяется как

$$R_s = M[G] = \int_0^{\infty} g f(g) dg. \quad (10.18)$$

Полный ожидаемый вред/ущерб от аварии определяется как математическое ожидание случайной величины, определяемой как коллективным риском, так и ожидаемым ущербом:

$$R_{\Sigma} = H \sum n_i p_i + \int g F'(g) dg, \quad (10.19)$$

где  $H$  – стоимостная оценка человеческой жизни.

Дисперсия случайной величины  $Y$  – математическое ожидание квадрата соответствующей центрированной величины  $Y : D[Y] = M[Y^2]$ .

Таким образом, при анализе риска необходимо учитывать следующие рекомендации и выводы:

1) при количественной оценке риска аварии ОПО задача максимум – определить полный ряд распределения рассматриваемых случайных величин  $X$ ,  $D$  и  $N$ , построить  $F/Y$ -кривые или функцию плотности вероятности потерь  $G$  от аварии, а задача минимум – построить репрезентативный статистический ряд  $Y$  и оценить основные числовые характеристики случайных величин материальных  $G$  и людских  $N$  потерь – математическое ожидание, моду и дисперсию;

2) использование более полного набора достоверных количественных показателей позволяет более обоснованно оценивать риск аварии и, соответственно, предлагать рекомендации, направленные на обеспечение промышленной безопасности ОПО;

3) применение в промышленности новых технологий, использование нетрадиционных технических решений не предполагает быстрого получения достаточного числа статистически достоверных данных по аварийности, а также безотказности эксплуатируемого оборудования. Расчеты вероятности аварийных ситуаций, как правило, необходимы для сравнительного анализа различных вариантов, обоснования и оптимизации предлагаемых мер безопасности.

### **Контрольные вопросы**

1. Применение распределения Пуассона для оценки риска аварий.
2. Как можно оценить степень риска поражения людей и нанесения ущерба при авариях?
3. С помощью каких величин анализируют аварии на ОПО?

## 11. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ

### 11.1. Организация работ по обеспечению надёжности

Решение проблем надёжности зависит не только от того, насколько глубоко разработаны теория надёжности и инженерные методы, но также и от того, как организована работа по обеспечению надёжности.

Чтобы объект был надёжным в работе, необходимо осуществить в определенной последовательности комплекс мероприятий на всех стадиях его разработки, изготовления и использования. Содержание таких мероприятий и их последовательность различны для разных видов объектов, так как при разработке мер по обеспечению надёжности должны учитываться особенности объекта, способы его изготовления и условия использования.

Перечень мероприятий по обеспечению надёжности объекта на всех этапах его разработки, изготовления и эксплуатации с указанием сроков и исполнителей называется *программой обеспечения надёжности* (ПОН) объекта. Особенность такой программы в том, что она объединяет усилия большого числа исполнителей и выполняется на протяжении значительного периода времени.

Программа обеспечения надёжности разрабатывается отдельно для каждого из трех этапов создания объекта.

1. Предварительные исследования объекта, в ходе которых анализируются требования к объекту, изучается объём и характер информации, а также форма ее представления (передача по каналам связи и др.), выбирается техническое обеспечение с учётом возможности удовлетворения заявок на оборудование; изучаются характеристики надёжности изделий, предназначенных для оборудования объекта; в случае необходимости проводятся специальные испытания материалов, комплектующих элементов и аппаратуры с целью проверки характеристик, влияющих на надёжность (сопротивляемость износу и старению, устойчивость работы при воздействии неблагоприятных факторов и т. п.).

2. Техническое проектирование объекта, в ходе которого решаются следующие вопросы обеспечения надёжности: обоснование выбора структуры объекта и математического обеспечения; выбор методов контроля за правильностью работы объекта и его техническим состоянием; обеспечение рабочих режимов работы элементов аппаратуры в пределах заданных технических условий; защита элементов от неблагоприятных воздействий; выбор способа резер-

вирования. Решение этих вопросов сопровождается расчётами, испытаниями, математическим и физическим моделированием.

3. Производство и эксплуатация объекта; на протяжении этого этапа продолжается работа по обеспечению надёжности: выбор оптимальной технологии и программы производственных испытаний, оптимизация обслуживания объекта, обеспечение запасными изделиями, организация ремонта, сбор информации о надёжности объекта в процессе эксплуатации.

Успешное выполнение программы обеспечения надёжности зависит от качества организационного, технического, информационного и методологического обеспечения.

*Организационное обеспечение* – планирование и реализация работ по обеспечению надёжности; организация служб надёжности; планирование экономических, административных и правовых отношений между заказчиком, разработчиком и изготовителем продукции.

*Техническое обеспечение* определяется экспериментальной и производственной базой, уровнем технологии и метрологии.

*Информационное обеспечение* – сбор, накопление, обработка и использование данных о процессах разработки и эксплуатации систем, результатов анализа отказов и дефектов, данных об изменении документации, нарушении стабильности производства и других факторах отклонений от плана разработки и применения техники, а также данных по принятым мерам для предупреждения этих отклонений и защиты от их последствий.

*Методологическое обеспечение* включает в себя теоретическую базу и инженерные методы анализа надёжности систем на различных стадиях разработки, а также методы и алгоритмы, которые используются при реализации и анализе результатов внедрения программ обеспечения надёжности.

*Типовая программа обеспечения надёжности* состоит из четырёх разделов, в которых указываются общие положения, работы и мероприятия по обеспечению надёжности, методическое обеспечение и порядок контроля за выполнением ПОН и ее корректировки.

В частности, раздел 1 содержит исходные данные для разработки ПОН сложной системы (сведения о назначении и структуре, эксплуатационно-технические характеристики, пути обеспечения надёжности, условия эксплуатации). Здесь же приводится перечень ПОН подсистем. Он содержит требования, предъявляемые к надёжности подсистем, и научно-технические проблемы, которые должны быть решены при создании сложной системы.

Для наглядности и обобщения опыта реализации ПОН, возможности использования при машинной обработке материалы разделов 2–4 оформляют в виде таблиц (табл. 11.1–11.5).

Таблица 11.1

### Работы и мероприятия по обеспечению надёжности

Работы и мероприятия		Характер	Действительность	Отказ	Исполнитель	Методическое обеспечение	Срок	Отчетность	Примечание
Шифр	Формулировка								

Таблица 11.2

### Распределение работ и мероприятий по типовым отказам

Типовой отказ		Изделие	Период эксплуатации	Опасность появления	Опасность последствий	Мероприятия			Примечание
Шифр	Формулировка					Предупредительные	Контрольные	Защитные	

Таблица 11.3

### Исполнители работ

Исполнитель			Работы и мероприятия			Методические документы		Примечание
Шифр	Подразделение	Предприятие	Контроль	Исполнитель	Соисполнитель	Исполнитель	Соисполнитель	

**Методическое обеспечение**

Документ		Исполнители	Утверждение	Согласование	Мероприятия	Срок	Примечание
Шифр	Название						

Таблица 11.5

**Контрольные точки ПОН**

Событие	Контрольные мероприятия	Отчетность	Контролер	Примечание

**11.2. Сертификация систем обеспечения надёжности**

Стабильность уровня надёжности продукции подтверждается сертификатом системы качества предприятия. Требования к системе качества при этом устанавливаются международными стандартами ИСО 9001–9003, а право выдачи сертификата имеют организации (органы по сертификации систем качества), аккредитованные в национальной или международной системе сертификации.

Ввиду того, что стандарты распространяются на все виды продукции, разработок и услуг, в них не выделяются особо требования и процедуры оценки эффективности обеспечения надёжности на предприятии. Для изготовителей широкого круга продукции бытового и промышленного применения это обстоятельство не имеет особого значения, и сертификат на систему качества является достаточно полным доказательством наличия эффективных процедур обеспечения надёжности. Но для многих видов сложной наукоёмкой продукции и продукции двойного назначения, вследствие особой важности требований к ее надёжности, необходимо некоторое специальное подтверждение наличия на предприятии эффективных мер по ее обеспечению.

Международным стандартом ИСО 9000 – 4:93/МЭК 300–1: 93 «Руководство по управлению программой обеспечения общей надёжности» устанавливаются принципы такого подтверждения и соответствующие требования к системе обеспечения надёжности.

Условием применения стандарта является наличие на предприятии сертифицированной системы качества в соответствии со стандартами ИСО 9001, ИСО 9002 или ИСО 9003. Стандарт устанавливает по отношению к требованиям ИСО 9001–9003 дополнительные требования по разделам:

- обязанности руководства;
- элементы программы, не зависящие от продукции или проекта;
- элементы программы, характерные для продукции или проекта.

Стандартом предусматривается возможность выборочного использования его требований в зависимости от конкретных обстоятельств, для этого заинтересованные стороны должны оформить письменное соглашение.

Терминология, принятая в стандарте, отличается от принятой в отечественной литературе. Центральными понятиями стандарта являются: *программа* обеспечения общей надёжности и *план* обеспечения общей надёжности.

*Программа обеспечения общей надёжности* – документ, определяющий организационные структуры, обязанности, процедуры и ресурсы, используемые для управления общей надёжностью. Этот термин близок к понятию «система обеспечения надёжности», принятому в российской документации. Программа должна содержать все стадии жизненного цикла продукции от планирования до эксплуатации и, возможно, до изъятия из обращения.

*План обеспечения общей надёжности* – документ, определяющий специфический порядок обеспечения общей надёжности, ресурсы и последовательность действий в отношении конкретного вида продукции, контракта или проекта. Этот термин аналогичен понятию «программа обеспечения надёжности», принятому в российской документации. План обеспечения общей надёжности является составной частью общего производственного плана или плана проекта.

*Общая надёжность* – некоторый собирательный термин, используемый для определения характеристики эксплуатационной готовности и влияющих на нее факторов, а именно: характеристик надёжности, ремонтпригодности и материального обеспечения технического обслуживания и текущего ремонта. Термин используется только для общих описаний без количественной оценки.

Раздел стандарта «Обязанности руководства» включает ряд дополнительных по отношению к устанавливаемым стандартами ИСО 9001–9003 требований к элементам (процедурам) системы качества.

На предприятии утверждается и исполняется документ, выражающий политику предприятия, области обеспечения надёжности продукции и связанных с ней услуг. Этот документ может быть составной частью политики в области качества или разрабатываться и выполняться как самостоятельный документ.

На предприятии утверждаются и поддерживаются элементы программы обеспечения надёжности и соответствующие ресурсы. Элементы и ресурсы могут быть составной частью соответствующих элементов и ресурсов системы качества, но при этом отличаться от них.

Деятельность предприятия на ранних этапах планирования и проектирования продукции должна основываться на некотором документально оформленном задании по обеспечению надёжности продукции, включающем количественные характеристики (по стандарту – «технические условия по общей надёжности»), составленные на базе изучения рынка. Эти требования должны быть распределены по составным частям разрабатываемой продукции (п. 6.3 ИСО 9001).

Анализ со стороны руководства (п. 4.1.3 ИСО 9001) должен содержать анализ программ общей надёжности. Помимо этого, на предприятии утверждается и соблюдается процедура систематического, рекуррентного (когда каждый последующий связан с предыдущим) и независимого анализа соответствия принятых процессов, процедур и средств установленным целям и задачам. Следует отметить, что этот анализ должен содержать оценку экономической эффективности программы с точки зрения фактического повышения надёжности, снижения затрат на техническое обслуживание и др.

Раздел «Элементы программы, не зависящие от продукции или проекта» определяет общие для всех видов продукции или работ требования по обеспечению надёжности, в том числе:

- к порядку оформления структуры и элементов программы;
- методам и моделям, применяемым для прогнозирования, анализа и оценки надёжности;
- банкам данных о надёжности продукции при испытаниях и/или эксплуатации;
- регистрации документов и данных, относящихся к обеспечению надёжности.

Раздел «Элементы программы, характерные для продукции или проекта» содержит широкий спектр конкретных требований к практическим методам обеспечения надёжности на предприятии:

- к планированию и управлению;
- анализу контракта и контрактных связей;

- качеству инженерных разработок;
- качеству продукции, поступающей из внешних источников;
- анализу, прогнозированию и рассмотрению проекта;
- проверке, оценке и испытанию объектов;
- планированию режима эксплуатации и материального обеспечения технического обслуживания и текущего ремонта и т.д.

### **11.3. Подготовленность к аварийным ситуациям и реагирование на них**

Согласно ГОСТ Р ИСО 14004–98 «Системы управления окружающей средой. Общие руководящие указания по принципам, системам и средствам обеспечения функционирования», на объектах должны быть разработаны аварийные планы и процедуры, чтобы обеспечить надлежащее реагирование на аварийные ситуации.

Повышение промышленной безопасности, снижение рисков возникновения возможных аварийных ситуаций обеспечивается внедрением систем управления охраной труда в соответствии с ГОСТ Р 12.0.006–2002 (OHSAS 18001–99).

#### **11.3.1. Цель мероприятий по обеспечению аварийной подготовленности**

Аварийная подготовленность и реагирование подразумевают осуществление соответствующих действий при таких обстоятельствах, как аварийные ситуации, аварии, чрезвычайные ситуации, катастрофы и т. п., которые могут привести к нанесению вреда жизни или здоровью работников, повреждению имущества организации, нарушению окружающей обстановки на рабочих местах либо к их сочетанию.

Аварийная подготовленность и реагирование осуществляются в соответствии с нормативно-технической документацией, а именно:

- правилами технической безопасности;
- инструкциями по тушению пожаров в электроустановках организаций, по подготовке и проведению командно-штабных, тактико-специальных, комплексных учений и объектовых тренировок с органами управления, силами государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и гражданской обороны, другими документами.

На объектах должны поддерживаться в рабочем состоянии процедуры предотвращения экологических происшествий и потенциальных аварийных ситуаций.

При разработке процедур, относящихся к операциям, и мер по управлению операциями по возможности учитываются:

- аварийные выбросы в атмосферу;
- аварийные сбросы в воду и землю;
- специфическое влияние аварийных выбросов на окружающую среду и экосистему.

При этом необходимо учитывать возможность возникновения:

- аномальных рабочих условий;
- аварий или потенциальных аварийных ситуаций.

### **11.3.2. Задачи организации по обеспечению аварийной подготовленности**

Основными задачами организации при возможных аварийных ситуациях являются:

- установление вероятных участков (производств) возникновения аварийных ситуаций;
- предотвращение и снижение воздействий аварийных ситуаций на жизнь и здоровье людей;
- локализация аварийных ситуаций и ликвидация последствий аварий;
- анализ причин возникновения аварийной ситуации, разработка мероприятий по их устранению;
- анализ и проверка подготовленности персонала к локализации.

Необходимо отметить, что аварийные ситуации делятся на внешние и внутренние.

Внешние – это те аварийные ситуации, возникновение которых не зависит от действий персонала и производственной деятельности организации. Реагирование на внешние аварийные ситуации осуществляется по Плану ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС), согласованному с органом управления по гражданской обороне (ГО).

Внутренние аварийные ситуации зависят от действий персонала и производственной деятельности организации, износа технологического оборудования, машин, механизмов, проведения профилактического обслуживания и ремонта, ошибок эксплуатирующего персонала, ошибок, допущенных при проектировании, нарушений технологического процесса.

### **11.3.3. Действия по обеспечению аварийной подготовленности**

Для обеспечения подготовленности к возможным аварийным ситуациям выполняются следующие действия:

- проведение анализа потенциального риска в деятельности организации и определение опасных участков, степени их опасности и возможных последствий;
- разработка ПЛАС и внесение в инструкции по охране труда (ОТ) описания порядка действий персонала при возникновении возможных аварийных ситуаций;
- подготовка эксплуатирующего и обслуживающего персонала, нештатных формирований к локализации и ликвидации возникших аварийных ситуаций и их последствий;
- проведение тренировок обслуживающего персонала и нештатных формирований по выполнению ПЛАС, учений по ГО и чрезвычайным ситуациям (ЧС);
- проверка и корректировка ПЛАС;
- проверка работы аварийной сигнализации и аварийного отключения оборудования;
- проведение анализа подготовленности к локализации и ликвидации аварийных ситуаций и последствий аварий;
- разработка мероприятий по снижению риска возникновения ЧС и уменьшению ущерба здоровью людей от их последствий.

### **11.3.4. Анализ произошедших аварий**

При анализе произошедших аварий выполняются следующие действия:

- документальное фиксирование факта аварий и их последствий;
- классификация аварий;
- оценка риска возможного повторения подобной аварии;
- разработка корректирующих мероприятий по предотвращению возможного повторения подобных аварий;
- ознакомление персонала с внесенными изменениями;
- составление отчетов о проведенном анализе аварий и несчастных случаев.

### **11.3.5. Предупреждение, локализация, ликвидация и учет аварийных ситуаций и аварий**

Предполагается в организации создать координационный орган системы предупреждения и ликвидации аварийных ситуаций и аварий в форме комиссии по чрезвычайным ситуациям (КЧС).

Как рабочий орган КЧС, штаб КЧС обеспечивает планирование, техническое сопровождение работы КЧС, контроль выполнения принятых КЧС решений.

Положение о КЧС разрабатывается в соответствии с руководящими документами вышестоящих органов ГО и ЧС, согласовывается с городским органом управления по ГО и ЧС и утверждается руководителем организации. Приказ о составе КЧС подготавливает начальник штаба ГО и ЧС (инженер по ГО и ЧС), а утверждает руководитель организации.

Основными задачами КЧС являются:

- разработка и реализация мероприятий по предупреждению аварийных ситуаций, повышению устойчивости функционирования потенциально опасных объектов, а также по обеспечению их стабильной работы при возникновении аварийных ситуаций;

- организация работы по созданию на потенциально опасных объектах локальных систем раннего обнаружения и оповещения, поддержание их в состоянии постоянной готовности;

- обеспечение готовности органов управления, сил и средств организации к действиям при аварийных ситуациях;

- руководство ликвидацией аварийных ситуаций и эвакуацией работников организации;

- создание производственных резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации аварийных ситуаций;

- обеспечение подготовки руководящего состава, а также работников организации к действиям в аварийных ситуациях.

С целью локализации аварийных ситуаций и ликвидации последствий аварий приказом руководителя организации на базе существующих подразделений создаются нештатные формирования. Проект приказа о нештатных формированиях подготавливает начальник штаба ГО и ЧС (инженер по ГО и ЧС) и утверждает руководитель организации.

Состав и оснащение нештатных формирований устанавливаются штабом ГО организации применительно к структуре, рекомендуемой территориальным управлением МЧС РБ, и утверждаются приказом руководителя организации.

По возможным аварийным ситуациям в организации проводится оценка потенциального риска от объекта, оборудования, технологического процесса и степени их воздействия на работающий персонал.

Оценка риска зависит от степени опасности объектов, оборудования, технологических процессов, а также последствий аварий и их воздействий на обслуживающий персонал, население и т. д.

В каждом подразделении организации составляется список возможных аварийных ситуаций.

Решением КЧС организации, зафиксированным в протоколе заседания, возможные аварийные ситуации вносятся в Перечень потенциальных аварийных ситуаций организации.

Перечень составляет начальник штаба ГО и ЧС (инженер по ГО и ЧС) в одном экземпляре. Этот документ находится в КЧС и актуализируется по результатам предыдущего периода работы организации 2 раза в год.

На основании анализа потенциального риска и в соответствии с Перечнем потенциальных аварийных ситуаций в организации разрабатываются и утверждаются планы ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС).

Реагирование на аварийные ситуации осуществляется в соответствии с разработанными ПЛАС.

Руководство работами по локализации и ликвидации аварийных ситуаций осуществляется в зависимости от уровня развития аварии ответственным руководителем подразделения или организации либо председателем КЧС.

**Действия в случае аварии.** В случае аварии на опасном производственном объекте начальник штаба ГО и ЧС организации:

– незамедлительно сообщает об этом по установленной форме вышестоящей организации, а при авариях, сопровождающихся выбросами, разливами опасных веществ, взрывами, дополнительно сообщает в территориальные органы МЧС, другие министерства, если это необходимо, а также КЧС при кабинете министров;

– при групповых несчастных случаях и (или) несчастных случаях с тяжелым и смертельным исходом, происшедших в результате аварии, незамедлительно сообщает об этом также другим органам и организациям согласно Правилам расследования и учета несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

– сохраняет неизменным место аварии до начала расследования, за исключением случаев, когда необходимо вести работы по ликвидации аварии, с сохранению жизни и здоровья людей;

- осуществляет мероприятия по локализации и ликвидации последствий аварий на опасном производственном объекте;
- принимает меры по защите окружающей среды, жизни и здоровья работников в случае аварии на опасном производственном объекте;
- представляет комиссии по техническому расследованию причин аварии всю информацию, необходимую указанной комиссии для осуществления своих полномочий.

При других авариях (например, разрушении зданий и сооружений, при перевозке опасных грузов, на электрических, теплоиспользующих установках) действия должностных лиц организации аналогичны.

**Действия после ликвидации аварии.** Для безопасного возобновления производства после ликвидации аварии:

- обследуются здания, оборудование, трубопроводы, вентиляция, электропроводки с целью установления полного соответствия их требованиям производства и безопасности;
- последовательно проводится включение электроэнергии, подача газа, пара и другие мероприятия по безопасному пуску производства после ликвидации аварии;
- оформляется установленная документация и разрешение на запуск производства.

Техническое расследование причин аварий и инцидентов, их учет и анализ аварийных ситуаций, произошедших на опасном производственном объекте, проводится комиссией, назначаемой приказом руководителя.

Учет аварий и инцидентов, произошедших на опасных производственных объектах, осуществляет начальник штаба ГО и ЧС (инженер по ГО и ЧС) в журнале учета аварий, произошедших на опасных производственных объектах, и журнале учета инцидентов, произошедших на опасных производственных объектах.

Результаты анализа причин аварий и инцидентов оформляются актом в произвольной форме.

### **11.3.6. Техническое обеспечение аварийной подготовленности и реагирования**

Для обеспечения аварийной подготовленности и реагирования в организации имеется следующее аварийное оснащение:

- системы аварийной сигнализации;
- аварийное освещение и источники аварийного энергоснабжения;

- средства эвакуации;
- защитные сооружения;
- аварийные запорные клапаны, переключатели и автоматические выключатели;
- пожарное оборудование;
- средства для оказания первой помощи (включая специальные душевые, пункты для промывания глаз и др.);
- средства связи.

Работоспособность аварийного оснащения проверяется через установленные промежутки времени по графику в зависимости от вида аварийного оснащения лицами, назначаемыми приказом руководителя организации, либо сторонними организациями, имеющими соответствующие разрешения.

Результаты испытаний оформляются в виде протоколов.

### **Контрольные вопросы**

1. Обоснуйте экономическую эффективность мероприятий по повышению надёжности.
2. К чему приводит недостаточно высокий уровень надёжности?
3. Основные этапы программы обеспечения надёжности.
4. От чего зависит успешное выполнение программы обеспечения надёжности?
5. Что является независимым подтверждением стабильного уровня надёжности на предприятии?
6. Дайте определение термина «план обеспечения общей надёжности».
7. Что понимается под аварийной подготовленностью и реагированием?
8. Цель мероприятий по обеспечению аварийной подготовленности.
9. Задачи организации по обеспечению аварийной подготовленности.
10. Действия по обеспечению аварийной подготовленности.
11. Действия при анализе произошедших аварий.
12. Действия в случае аварии и при ее ликвидации.
13. Техническое обеспечение аварийной подготовленности и реагирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание первой части учебного пособия соответствует образовательному стандарту по дисциплине «Надежность технических систем и техногенный риск» для направления «Безопасность жизнедеятельности». С целью ограничения объема пособия материалы ряда глав даны в сокращенном виде. С другой стороны, более подробно рассматриваются отдельные вопросы, например, в восьмой главе.

О перспективах развития учебной дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск» можно сказать следующее. В государственных стандартах отражена взаимосвязь понятий надежности и риска. Определены цели анализа риска на различных стадиях жизненного цикла опасных систем, оборудования или изделий. Намечены этапы, по которым должен осуществляться анализ риска. Сформулированы требования к персоналу, проводящему анализ риска, его квалификации и т. д. При этом содержатся очень краткие описания методов, используемых в процессе анализа рисков.

В то же время одним из важнейших требований к уровню подготовки специалистов является свободное владение данными методами.

В настоящем учебном пособии сделана попытка разработки методов анализа риска, более пристальное внимание уделено анализу «дерева неисправностей».

В соответствии со сказанным выше, задача развития дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск» может быть сформулирована следующим образом. Необходимо разработать учебные пособия, детально описывающие остальные методы анализа риска, в том числе основные и дополнительные, из числа определенных стандартами.

К сожалению, некоторые стандарты России имеют статус «отменен». Несмотря на это, приведенные в них методики расчета надежности и риска, используемые также в других странах, например западноевропейских, востребованы и постоянно развиваются. В частности, произошедшие на японских АЭС катастрофические события неизбежно вызовут изменение подходов к методам обеспечения безопасности подобных технических объектов.

Для самостоятельного изучения дисциплины можно предложить учебник для вузов В. А. Острейковского [53], а также учебник Л. Н. Александровской с соавторами [22].

Относительно перспектив развития теории надежности можно напомнить слова академика В. В. Гнеденко из предисловия ко второму тому справочника «Надежность и эффективность в технике»: «Развиваться же ей (теории надежности. – *примеч. авт.*) предстоит столько времени, сколько будет существовать промышленность и массовое производство».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О безопасности гидротехнических сооружений: федер. закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ // Рос. газ. – 1997. – 29 июля.
2. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федер. закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ // Рос. газ. – 1997. – 30 июля.
3. О газоснабжении в Российской Федерации: федер. закон от 31.03.1999 № 69-ФЗ // Рос. газ. – 1999. – 8 апр.
4. Об охране окружающей среды: федер. закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ // Рос. газ. – 2002. – 12 янв.
5. О техническом регулировании: федер. закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ // Рос. газ. – 2002. – 31 дек.
6. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ // Рос. газ. – 2008. – 1 авг.
7. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 37 с.
8. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Госстандарт СССР, 1992. – 68 с.
9. ГОСТ Р 22.0.02–94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 16 с.
10. ГОСТ Р 22.0.03–94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 12 с.
11. ГОСТ Р 22.0.05–94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 16 с.
12. ГОСТ Р 27. 310–95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».
13. ГОСТ Р 22.0.04–95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Биолого-социальные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 12 с.
14. ГОСТ Р 22.1.01–95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 10 с.

15. ГОСТ Р 22.1.02–95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

16. ГОСТ Р 51901–2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

17. ГОСТ Р 51901.13–2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2005. – 16 с.

18. РД 26-01-143-83. Надежность изделий химического машиностроения. Оценка надежности и эффективности при проектировании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.skonline.ru/doc/7966.html>

19. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов / Госгортехнадзор России. – М.: ПИО ОБТ, 2002. – 35 с.

20. Государственный доклад МЧС России о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций в 2002 г. – 2003. – № 5. – С. 3–185.

21. Государственный доклад МЧС России о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций в 2003 г. – 2004. – № 5. – С. 3–177.

22. Александровская Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: учебник / Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А. Лисов. – М.: Логос, 2003. – 208 с.

23. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание: математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.

24. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере / П.Г. Белов. – М.: Академия, 2003. – 512 с.

25. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности / П.Г. Белов. – Киев: КМУ ГА, 1997. – 426 с.

26. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.

27. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.

28. Ветошкин А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск / А.Г. Ветошкин. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 67 с.

29. Ветошкин А.Г. Техногенный риск и безопасность / А.Г. Ветошкин, К.Р. Таранцева. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. – 58 с.
30. Гражданкин А.И. О влиянии «управления комплексным риском» на рост угроз техногенного характера / А.И. Гражданкин, А.С. Печеркин // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 3. – С. 38–42.
31. Гражданкин А.И. Оценка техногенного риска: техническое регулирование, стандартизация, критерии приемлемости / А.И. Гражданкин // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 7. – С. 48–49.
32. Гражданкин А.И. Риск аварии как оценка нежелательных потерь / А.И. Гражданкин [и др.] // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: тр. Междунар. науч. школы МАБР-2002 (Санкт-Петербург, 2–5 июля, 2002 г.). – СПб.: Изд-во «Бизнес-Пресса», 2002. – С. 515–518.
33. Гражданкин А.И. Управление риском: миф или реальность / А.И. Гражданкин // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 1. – С. 48–49.
34. Гражданкин А.И. Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов / А.И. Гражданкин, П.Г. Белов // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – № 11. – С. 6–10.
35. Декларирование промышленной безопасности опасных производственных объектов: сб. док. / Госгортехнадзор России. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: НТЦ по безопасности в пром-сти Гостехнадзора России, 2002. – 261 с.
36. Защита в чрезвычайных ситуациях: учеб. пособие для вузов / С.А. Ковалев [и др.]; ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2003. – 400 с.
37. Комаревич Л.В. Введение в теорию надежности сложных технических систем: учеб. пособие / Л.В. Комаревич. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1995. – 80 с.
38. Кравец В.А. Системный анализ безопасности в нефтяной и газовой промышленности / В.А. Кравец. – М.: Недра, 1984. – 118 с.
39. Лайтинен Х. Пособие по наблюдению условий труда на рабочем месте в промышленности. Система Элмери [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nacot.ru/files/x2.doc>.
40. Лисанов М.В. О техническом регулировании и критериях приемлемого риска / М.В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 5. – С. 11–14.
41. Ллойд Д. Надежность: Организация исследований, методы, математический аппарат: [пер. с англ.] / Д. Ллойд. – М.: Сов. радио, 1980. – 686 с.
42. Любарская Е. Цена человеческой жизни [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lenta.ru/articles/2004/02/18/lifeprice/>.

43. Мартынюк В.Ф. Анализ риска и его нормативное обеспечение / В.Ф. Мартынюк [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 1995. – № 11. – С. 55–62.
44. Машков А.К. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие / А.К. Машков, В.С. Сердюк, Л.О. Штриплинг. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. – 72 с.
45. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах. – М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность» Госгортехнадзора России, 2000. – Сер. 27; вып. 1. – 96 с.
46. Надежность в машиностроении: справ. / под ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.
47. Надежность технических систем: справ. / Ю.К. Беляев [и др.]; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
48. Надежность технических систем и техногенный риск: метод. указания к самостоят. работе студентов / сост.: В.С. Сердюк, А.Б. Корчагин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 89 с.
49. Надёжность технических систем и техногенный риск: метод. указания к выполнению практ. работ / сост.: В.С. Сердюк, А.Б. Корчагин, М.Г. Нинилина. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 20 с.
50. Основные направления оценки рисков рабочей среды: [пер. с лат.] / сост.: В. Кальскис, И. Кристиныш, Ж. Роя. – Рига: SIA «Jelgavas tipografija», 2005. – 72 с.
51. О состоянии и об охране окружающей среды Омской области в 2008 году / М-во сельского хозяйства и продовольствия Ом. обл. – Омск: АРТЛИК, 2009. – 200 с.
52. Основные показатели риска аварии в терминах теории вероятностей / А.И. Гражданкин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 7. – С. 35–39.
53. Острейковский В.А. Теория надежности: учебник для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
54. Оценка вероятности возникновения опасных ситуаций: метод. указания / сост. Э.А. Гомзиков. – СПб.: С.-Петербург. реч. гос. ун-т водных коммуникаций, 1999. – 15 с.
55. Сборник задач по теории надёжности / А.М. Половко [и др.] / под ред. А.М. Половко. – М.: Сов. радио, 1972. – 408 с.

56. Сердюк В.С. Надежность технических систем и техногенный риск: конспект лекций / В.С. Сердюк, А.Б. Корчагин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 86 с.
57. Синотов А.Г. Планирование испытаний на надежность: учеб. пособие / А.Г. Синотов. – М.: АСМС, 2001. – 124 с.
58. Словарь иностранных слов. – 18-е изд., стер. – М.: Рус. яз., 1989. – 624 с.
59. Справочник по надежности / Ю.Г. Епишин, Б.А. Смиренин, Б.Р. Левин; под ред. Б.Р. Левина. – М.: Мир, 1969. – Т. 1. – 339 с.
60. Справочник по надежности / П.К. Горохов, Б.Е. Бердичевский; под ред. Б.Е. Бердичевского. – М.: Мир, 1970. – Т. 2. – 304 с.
61. Справочник по надежности / Ф.С. Соловейчик, Б.Е. Бердичевский. – М.: Мир, 1970. – Т. 3. – 376 с.
62. Сухарев М.Г. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов / М. Г. Сухарев, А.М. Карасевич. – М.: Нефть и газ, 2000. – 271 с.
63. Труханов В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 1995. – 303 с.
64. Хенли Э.Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э.Дж. Хенли, Х. Кумамото; пер. с англ. В.С. Сыромятникова, Г.С. Деминой; под общ. ред. В.С. Сыромятникова. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
65. Чернова Г.В. Практика управления рисками на уровне предприятия: учеб. пособие / Г.В. Чернова. – СПб.: Питер, 2000. – 172 с.
66. Эксплуатационная надежность машин, конструкций, процессов, изделий: межвуз. сб. науч. тр. / Моск. ин-т приборостроения, Всесоюз. заоч. ин-т текстил. и лег. пром-сти; [редкол.: Г.И. Страхов (отв. ред.) и др.]. – М.: ВЗИТЛП, 1991. – 171 с.
67. Пул Ч. Нанотехнологии: учеб. пособие по направлению подготовки «Нанотехнологии»: [пер. с англ.] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс; под ред. Ю.И. Головина; доп. В.В. Лугинина. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2006. – 334.

*Учебное издание*

**Корчагин Анатолий Борисович**  
**Сердюк Виталий Степанович**  
**Бокарев Александр Иванович**

# **НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Учебное пособие в двух частях

## **Часть 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ**

Редактор *М. А. Болдырева*  
Компьютерная верстка *Е. В. Беспаловой*

ИД № 06039 от 12.10.2001 г.

Сводный темплан 2011 г.

Подписано в печать 22.04.2011. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 14,25. Уч.-изд. л. 14,25.

Тираж 100 экз. Заказ 278.

---

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12  
Типография ОмГТУ