

Министерство образования Российской Федерации  
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА

**А.Г.Ветошкин**

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Учебное пособие

Пенза 2003

УДК 621.192

ББК 30.14я2

Ветошкин А.Г. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК. – Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.

Рассмотрена концепция надежности технических систем и производственной безопасности как составной части техногенной безопасности. Приведены основные термины и определения надежности технических систем, указаны основные опасности технических систем, обоснована актуальность проблемы безопасности с точки зрения ее социально-экономической значимости. Рассмотрены основные положения теории надежности технических систем и техногенного риска. Приведены математические формулировки, используемые при оценке и расчете основных свойств и параметров надежности технических объектов, рассмотрены элементы физики отказов, структурные схемы надежности технических систем и их расчет, сформулированы основные методы повышения надежности и примеры использования теории надежности для оценки безопасности человеко-машинных систем. Рассмотрена методология анализа и оценки техногенного риска, приведены основные качественные и количественные методы оценки риска, методология оценки надежности, безопасности и риска с использованием логико-графических методов анализа, критерии приемлемого риска, принципы управления риском, рассмотрены примеры использования концепции риска в инженерной практике.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Инженерная экология» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и предназначено для студентов специальности 330200 «Инженерная защита окружающей среды». Оно может быть использовано при подготовке студентов других инженерных специальностей, изучающих дисциплину «Безопасность жизнедеятельности».

Рецензенты:

Кафедра «Инженерная экология» Пензенского технологического института (зав. кафедрой кандидат технических наук, доцент, член-корр. Нью-Йоркской академии наук К.Р.Таранцева).

Кандидат технических наук, профессор, академик МАНЭБ В.В. Арбузов (Пензенский филиал Международного независимого эколого-политологического университета).

Издательство ПГУАиС  
А.Г.Ветошкин

## Содержание

Введение.

1. Основные понятия надежности технических систем.
2. Показатели надежности технических систем.
3. Модели распределений, используемых в теории надежности.
  - 3.1. Закон распределения Пуассона.
  - 3.2. Экспоненциальное распределение
  - 3.3. Нормальный закон распределения.
  - 3.4. Логарифмически нормальное распределение.
  - 3.5. Распределение Вейбулла.
  - 3.6. Гамма-распределение.
  - 3.7. Установление функции распределения показателей надежности по данным статистической информации.
4. Математические зависимости для оценки надежности.
  - 4.1. Функциональные зависимости надежности.
  - 4.2. Теорема сложения вероятностей.
  - 4.3. Теорема умножения вероятностей.
  - 4.4. Формула полной вероятности.
5. Причины потери работоспособности технического объекта
  - 5.1. Источники и причины изменения начальных параметров технической системы.
  - 5.2. Процессы, снижающие работоспособность системы
  - 5.3. Физика отказов.
    - 5.3.1. Анализ закономерностей изменения свойств материалов
    - 5.3.2. Законы состояния.
    - 5.3.3. Законы старения.
  - 5.4. Множественные отказы.
6. Основные характеристики надежности элементов и систем.
  - 6.1. Показатели надежности невосстанавливаемого элемента.
  - 6.2. Показатели надежности восстанавливаемого элемента.
  - 6.3. Показатели надежности системы, состоящей из независимых элементов.
  - 6.4. Выбор и обоснование показателей надежности технических систем.
  - 6.5. Распределение нормируемых показателей надежности.
7. Расчет показателей надежности технических систем.
  - 7.1. Структурные модели надежности сложных систем.
  - 7.2. Структурная схема надежности системы с последовательным соединением элементов.
  - 7.3. Структурные схемы надежности систем с параллельным соединением элементов.
  - 7.4. Структурные схемы надежности систем с другими

- видами соединения элементов.
- 7.5. Зависимости для расчета вероятности безотказной работы по заданному критерию.
  - 7.6. Проектный расчет надежности технической системы.
  - 7.7. Применение теории надежности для оценки безопасности технических систем.
  - 7.8. Показатели надежности при оценке безопасности систем «человек – машина» (СЧМ).
  - 7.9. Роль инженерной психологии в обеспечении надежности.
  8. Логико-графические методы анализа надежности и риска.
    - 8.1. Определения и символы, используемые при построении дерева.
    - 8.2. Процедура анализа дерева отказов.
    - 8.3. Построение дерева отказов.
    - 8.4. Качественная и количественная оценка дерева отказов.
    - 8.5. Аналитический вывод для простых схем дерева отказов.
    - 8.6. Дерево с повторяющимися событиями.
    - 8.7. Вероятностная оценка дерева отказов.
    - 8.8. Преимущества и недостатки метода дерева отказов.
  9. Методы обеспечения надежности сложных систем.
    - 9.1. Конструктивные способы обеспечения надежности.
    - 9.2. Технологические способы обеспечения надежности изделий в процессе изготовления.
    - 9.3. Обеспечение надежности сложных технических систем в условиях эксплуатации.
    - 9.4. Пути повышения надежности сложных технических систем при эксплуатации.
    - 9.5. Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надежности техники при эксплуатации.
  10. Основы теории и практики техногенного риска.
    - 10.1. Понятие техногенного риска.
    - 10.2. Методология анализа и оценки риска.
    - 10.3. Качественные методы анализа риска.
    - 10.4. Количественная оценка риска.
    - 10.5. Критерии приемлемого риска.
    - 10.6. Управление риском .
    - 10.7. Применение теории риска в технических системах.
    - 10.8. Анализ и оценка риска при декларировании безопасности производственного объекта.
    - 10.9. Оценка риска аварий.

10.10. Ионизирующее излучение как источник риска.

Приложения.

Таблица П.1. Значения нормальной функции распределения.

Таблица П.2. Квантили  $\chi^2$ .

Таблица П.3. Критерий Колмогорова.

Таблица П.4. Классификация источников и уровней риска смерти человека в промышленно развитых странах.

Таблица П.5. Сравнение методов анализа риска

Таблица П.6. Показатели риска промышленного изделия

Приложение П.7. Схема оценки профессионального риска

Литература.

## Введение

Переход к новым механизмам хозяйствования и развитому рынку путем интенсификации всех производственных процессов невозможен без более полного использования достижений научно-технического прогресса, эффективного использования ресурсов, снижения ущерба от аварийности и травматизма. Решение этой грандиозной задачи требует научно обоснованных подходов к организации и обеспечению безопасности всех отраслей промышленности, сельского хозяйства, транспорта и энергетики.

Актуальность проблемы обеспечения безопасности особенно возрастает на современном этапе развития производительных сил, когда из-за трудно предсказуемых техногенных и экологических последствий чрезвычайных происшествий поставлено под сомнение само существование человеческого общества. Рассматриваемая проблема становится все более острой как неизбежное следствие происходящей научно-технической революции, т.е. следствием обострения противоречий между новыми средствами производства и традиционными способами их использования.

Современная цивилизация столкнулась с грандиозной проблемой, заключающейся в том, что основа бытия общества – промышленность, сконцентрировав в себе колоссальные запасы энергии и новых материалов, стала угрожать жизни и здоровью людей, и даже окружающей среде.

Авария в условиях современной техносферы по своим масштабам и тяжести последствий стала сравнима с природными катастрофами и разрушительными последствиями военных действий с применением ядерного оружия. Как свидетельствуют статистические данные последние 20 лет 20-го века принесли 56% от наиболее крупных происшествий в промышленности и на транспорте. Считается, что ущерб от аварийности и травматизма достигает 10...15% от валового национального продукта промышленно развитых государств, а экологическое загрязнение окружающей природной среды и несовершенная техника безопасности являются причиной преждевременной смерти 20...30% мужчин и 10...20% женщин. В 1995 году на территории РФ было зафиксировано около 1550 чрезвычайных ситуаций, из которых 1150 носили техногенный характер и 400 – природный. В них пострадало 18000 человек, погибло свыше 1800.

Сложившаяся кризисная ситуация в вопросах аварийности и травматизма объясняется не только низкой культурой безопасности и технологической недисциплинированностью персонала, но и конструктивным несовершенством используемого в РФ промышленного и транспортного оборудования.

В наибольшей степени аварийность свойственна угольной, горнорудной, химической, нефтегазовой и металлургической отраслям промышленности, транспорту. Проблема предупреждения происшествий приобретает особую актуальность в атомной энергетике, химической промышленности, при эксплуатации военной техники, где используется и обращается мощные источники энергии, высокотоксичные и агрессивные вещества.

Основными причинами крупных техногенных аварий являются:

- отказы технических систем из-за дефектов изготовления и нарушений режимов эксплуатации;
- ошибочные действия операторов технических систем;
- концентрации различных производств в промышленных зонах;
- высокий энергетический уровень технических систем;
- внешние негативные воздействия на объекты энергетики, транспорта и др.

Безопасность – состояние защищённости отдельных лиц, общества и природной среды от чрезмерной опасности.

Государственная политика в области экологической и промышленной безопасности и новые концепции обеспечения безопасности и безаварийности производственных процессов на объектах экономики, диктуемые Федеральными законами «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 11.11.94 г., «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 №116-ФЗ, Федеральным законом "О радиационной безопасности населения" от 09.01.96 г. №3-ФЗ, Федеральным законом "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.99 г. №52-ФЗ, Федеральным законом "Об использовании атомной энергии" от 21.11.95 г. №170-ФЗ, Федеральным законом "Об охране окружающей " от 10.01.02 г. №7-ФЗ, предусматривают организационно-правовые нормы в области защиты граждан РФ, а также окружающей природной среды от чрезвычайных ситуаций различного происхождения и дают возможность объективной оценки опасностей и позволяют наметить пути, средства и мероприятия борьбы с ними.

Оценка и обеспечение надежности и безопасности технических систем при их создании, отработке и эксплуатации - одна из важнейших проблем в современной технике и экономике.

Оценка опасности различных производственных объектов заключается в определении возникновения возможных чрезвычайных ситуаций, разрушительных воздействий пожаров и взрывов на эти объекты, а также воздействия опасных факторов пожаров и взрывов на людей. Оценка этих опасных воздействий на стадии проектирования объектов осуществляется на основе теории надежности и нормативных требований, разработанных с учетом наиболее опасных условий протекания чрезвычайных ситуаций и проявления их негативных факторов, утечек и проливов опасных химических веществ, пожаров и взрывов, т.е. с учетом аварийной ситуации.

## 1. Основные понятия надежности технических систем

Термины *надежность*, *безопасность*, *опасность* и *риск* часто смешивают, при этом их значения перекрываются. Часто термины *анализ безопасности* или *анализ опасности* используются как равнозначные понятия. Наряду с термином *анализ надежности* они относятся к исследованию как работоспособности, отказов оборудования, потери работоспособности, так и процесса их возникновения.

Обеспечение надежности систем охватывает самые различные аспекты человеческой деятельности. Надежность является одной из важнейших характеристик, учитываемых на этапах разработки, проектирования и эксплуатации самых различных технических систем.

С развитием и усложнением техники углубилась и развивалась проблема ее надежности. Изучение причин, вызывающих отказы объектов, определение закономерностей, которым они подчиняются, разработка метода проверки надежности изделий и способов контроля надежности, методов расчетов и испытаний, изыскание путей и средств повышения надежности – являются предметом исследований надежности.

Если в результате анализа требуется определить параметры, характеризующие безопасность, необходимо в дополнение к отказам оборудования и нарушениям работоспособности системы рассмотреть возможность повреждений самого оборудования или вызываемых ими других повреждений. Если на этой стадии анализа безопасности предполагается возможность отказов в системе, то проводится анализ риска для того, чтобы определить последствия отказов в смысле ущерба, наносимого оборудованию, и последствий для людей, находящихся вблизи него.

Наука о надежности является комплексной наукой и развивается в тесном взаимодействии с другими науками, такими как физика, химия, математика и др., что особенно наглядно проявляется при определении надежности систем большого масштаба и сложности.

При изучении вопросов надежности рассматривают самые разнообразные объекты — изделия, сооружения, системы с их подсистемами. Надежность изделия зависит от надежности его элементов, и чем выше их надежность, тем выше надежность всего изделия.

*Надежность* — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Недостаточная надежность объекта приводит к огромным затратам на его ремонт, простоя машин, прекращению снабжения населения электроэнергией, водой, газом, транспортными средствами, невыполнению ответственных задач, иногда к авариям, связанным с большими экономическими потерями, разрушением крупных объектов и с человеческими жертвами. Чем меньше надежность машин, тем большие партии их приходится изготавливать, что приводит к перерасходу металла, росту производственных мощностей, завышению расходов на ремонт и эксплуатацию.

Надежность объекта является *комплексным свойством*, ее оценивают по четырем показателям — безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости или по сочетанию этих свойств.

*Безотказность* — свойство объекта сохранять работоспособность непрерывно в течение некоторого времени или некоторой наработки. Это свойство особенно важно для машин, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей. Безотказность свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования, в том числе, при хранении и транспортировке.

*Долговечность* — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.



В отличие от безотказности долговечность характеризуется продолжительностью работы объекта по суммарной наработке, прерываемой периодами для восстановления его работоспособности в плановых и неплановых ремонтах и при техническом обслуживании.

*Предельное состояние* — состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

*Ремонтопригодность* — свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта. Важность ремонтпригодности технических систем определяется огромными затратами на ремонт машин.

*Сохраняемость* — свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования. Практическая роль этого свойства велика для деталей, узлов и механизмов, находящихся на хранении в комплекте запасных принадлежностей.

Объекты подразделяют на *невосстанавливаемые*, которые не могут быть восстановлены потребителем и подлежат замене (например, электрические лампочки, подшипники, резисторы и т.д.), и *восстанавливаемые*, которые могут быть восстановлены потребителем (например, телевизор, автомобиль, трактор, станок и т.д.).

Надежность объекта характеризуется следующими состояниями: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное.

*Исправное состояние* — такое состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Исправное изделие обязательно работоспособно.

*Неисправное состояние* — такое состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Различают неисправности, не приводящие к отказам, и неисправности, приводящие к отказам. Например, повреждение окраски автомобиля означает его неисправное состояние, но такой автомобиль работоспособен.

*Работоспособным состоянием* называют такое состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, соответствующие требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное изделие является одновременно неисправным.

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

Отказы по характеру возникновения подразделяют на случайные и неслучайные (систематические).

*Случайные отказы* вызваны непредусмотренными нагрузками, скрытыми дефектами материалов, погрешностями изготовления, ошибками обслуживающего персонала.

*Неслучайные отказы* — это закономерные явления, вызывающие постепенное накопление повреждений, связанные с влиянием среды, времени, температуры, облучения и т. п.

В зависимости от возможности прогнозировать момент наступления отказа все отказы подразделяют на *внезапные* (поломки, заедания, отключения) и *постепенные* (износ, старение, коррозия).

По причинам возникновения отказы классифицируют на *конструктивные* (вызванные недостатками конструкции), *производственные* (вызванные нарушениями технологии изготовления) и *эксплуатационные* (вызванные неправильной эксплуатацией).

## 2. Показатели надежности технических систем

*Показателями надежности* называют количественные характеристики одного или нескольких свойств объекта, составляющих его надежность. К таким характеристикам относят, например, временные понятия — наработку, наработку до отказа, наработку между отказами, ресурс, срок службы, время восстановления. Значения этих показателей получают по результатам испытаний или эксплуатации.

По восстанавливаемости изделий показатели надежности подразделяют на *показатели для восстанавливаемых изделий* и *показатели невосстанавливаемых изделий*.

Применяются также *комплексные показатели*. Надежность изделий, в зависимости от их назначения, можно оценивать, используя либо часть показателей надежности, либо все показатели.

### **Показатели безотказности:**

- *вероятность безотказной работы* — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает;

- *средняя наработка до отказа* — математическое ожидание наработки объекта до первого отказа;

- *средняя наработка на отказ* — отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки;

- *интенсивность отказов* — условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Этот показатель относится к невосстанавливаемым изделиям.

### **Показатели долговечности.**

Количественные показатели долговечности восстанавливаемых изделий делятся на 2 группы.

#### 1. Показатели, связанные со сроком службы изделия:

- *срок службы* — календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновление после ремонта до перехода в предельное состояние;

- *средний срок службы* — математическое ожидание срока службы;

- *срок службы до первого капитального ремонта агрегата или узла* — это продолжительность эксплуатации до ремонта, выполняемого для восстановления исправности и полного или близкого к полному восстановления ресурса изделия с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые;

- *срок службы между капитальными ремонтами*, зависящий преимущественно от качества ремонта, т.е. от того, в какой степени восстановлен их ресурс;

- *суммарный срок службы* — это календарная продолжительность работы технической системы от начала эксплуатации до выбраковки с учетом времени работы после ремонта;

- *гамма-процентный срок службы* — календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Показатели долговечности, выраженные в календарном времени работы, позволяют непосредственно использовать их в планировании сроков организации ремонтов, поставки запасных частей, сроков замены оборудования. Недостаток этих показателей заключается в том, что они не позволяют учитывать интенсивность использования оборудования.

#### 2. Показатели, связанные с ресурсом изделия:

- *ресурс* — суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновление после ремонта до перехода в предельное состояние.

- *средний ресурс* — математическое ожидание ресурса; для технических систем в качестве критерия долговечности используют технический ресурс;

- *назначенный ресурс* — суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния;

- *гамма-процентный ресурс* — суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Единицы для измерения ресурса выбирают применительно к каждой отрасли и к каждому классу машин, агрегатов и конструкций отдельно. В качестве меры продолжительности эксплуатации может быть выбран любой неубывающий параметр, характеризующий продолжительность эксплуатации объекта (для самолетов и авиационных двигателей естественной мерой ресурса служит налет в часах, для автомобилей — пробег в километрах, для прокатных станков — масса прокатанного металла в тоннах). Если наработку измерять числом производственных циклов, то ресурс будет принимать дискретные значения.

### **Комплексные показатели надежности.**

Показателем, определяющим долговечность системы, объекта, машины, может служить коэффициент технического использования.

*Коэффициент технического использования* — отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и всех простоев для ремонта и технического обслуживания:

Коэффициент технического использования, взятый за период между плановыми ремонтами и техническим обслуживанием, называется коэффициентом готовности, который оценивает непредусмотренные остановки машины и что плановые ремонты и мероприятия по техническому обслуживанию не полностью выполняют свою роль.

*Коэффициент готовности* — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Физический смысл коэффициента готовности - это вероятность того, что в прогнозируемый момент времени изделие будет исправно, т.е. оно не будет находиться во внеплановом ремонте.

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

**Классификация показателей.** В зависимости от способа получения показатели подразделяют на *расчетные*, получаемые расчетными методами; *экспериментальные*, определяемые по данным испытаний; *эксплуатационные*, получаемые по данным эксплуатации.

В зависимости от области использования различают показатели надежности нормативные и оценочные.

*Нормативными* называют показатели надежности, регламентированные в нормативно-технической или конструкторской документации.

К *оценочным* относят фактические значения показателей надежности опытных образцов и серийной продукции, получаемые по результатам испытаний или эксплуатации.

## **3. Модели распределений, используемых в теории надежности**

### **3.1. Закон распределения Пуассона**

Распределение Пуассона играет особую роль в теории надежности, поскольку оно описывает закономерность появления случайных отказов в сложных системах. Этот закон нашел широкое применение при определении вероятности появления и восстановления отказов.

Случайная величина  $X$  распределена по *закону Пуассона*, если вероятность того, что эта величина примет определенное значение  $m$ , выражается формулой

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}, \quad (3.1)$$

где  $\lambda$  — параметр распределения (некоторая положительная величина);  $m=0, 1, 2, \dots$

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины  $X$  для закона Пуассона равны параметру распределения  $\lambda$ :

$$M_x = D_x = \lambda \quad (3.2)$$

Распределение Пуассона является *однопараметрическим* с параметром  $\lambda$ .

**Пример 3.1.** В ремонтную мастерскую по обслуживанию телевизоров поступают заявки со средней плотностью 5 шт. в течение рабочей смены за 10ч. Считая, что число заявок на

любом отрезке времени распределено по закону Пуассона, найти вероятность того, что за 2 ч рабочей смены поступят две заявки.

Решение. Среднее число заявок за 2 ч равно  $\lambda=2*5/10=1$ .

Применяя формулу (3.1), найдем вероятность поступления двух заявок

$$P = \frac{\lambda^2}{2!} e^{-\lambda} = \frac{1^2}{1 \cdot 2} e^{-1} = 0,184.$$

### 3.2. Экспоненциальное распределение

Экспоненциальный закон распределения<sup>^</sup> называемый также основным законом надежности, часто используют для прогнозирования надежности в период нормальной эксплуатации изделий, когда *постепенные отказы* еще не проявились и надежность характеризуется *внезапными отказами*. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную *интенсивность*. Экспоненциальное распределение находит довольно широкое применение в теории массового обслуживания, описывает распределение наработки на отказ сложных изделий, время безотказной работы элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Приведем примеры неблагоприятного сочетания условий работы деталей машин, вызывающих их внезапный отказ. Для зубчатой передачи это может быть действием максимальной нагрузки на наиболее слабый зуб при его зацеплении; для элементов радиоэлектронной аппаратуры — превышение допустимого тока или температурного режима.

Плотность распределения экспоненциального закона (рис. 3.1) описывается соотношением

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}; \quad (3.3)$$

функция распределения этого закона — соотношением

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}; \quad (3.4)$$

функция надежности

$$P(x) = 1 - F(x) = e^{-\lambda x}; \quad (3.5)$$

математическое ожидание случайной величины  $X$

$$M_x = \int_0^{\infty} x \lambda e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda}; \quad (3.6)$$

дисперсия случайной величины  $X$

$$D_x = \int_0^{\infty} x^2 \lambda e^{-\lambda x} dx - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (3.7)$$

Экспоненциальный закон в теории надежности нашел широкое применение, так как он прост для практического использования. Почти все задачи, решаемые в теории надежности, при использовании экспоненциального закона оказываются намного проще, чем при использовании других законов распределения. Основная причина такого упрощения состоит в том, что при экспоненциальном законе вероятность безотказной работы зависит только от длительности интервала и не зависит от времени предшествующей работы.

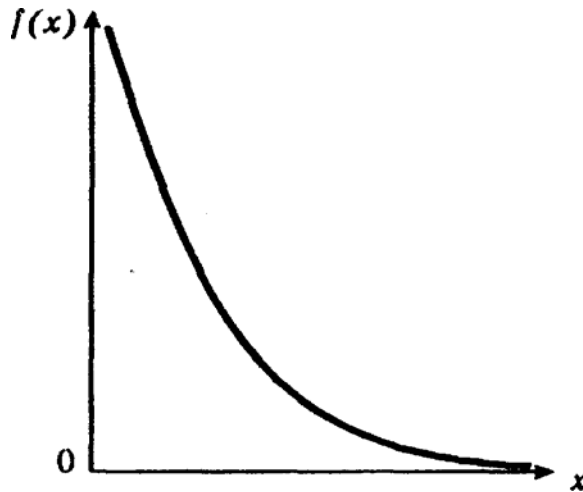


Рис. 3.1. График плотности экспоненциального распределения

**Пример 3.2.** По данным эксплуатации генератора установлено, что наработка на отказ подчиняется экспоненциальному закону с параметром  $\lambda=2 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

Найти вероятность безотказной работы за время  $t=100$  ч. Определить математическое ожидание наработки на отказ.

**Решение.** Для определения вероятности безотказной работы воспользуемся формулой (3.5), в соответствии с которой

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-2 \cdot 10^{-5} \cdot 100} = 0,998.$$

Математическое ожидание наработки на отказ равно

$$M_x = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-5}} = 5 \cdot 10^4 \text{ ч.}$$

### 3.3. Нормальный закон распределения

*Нормальный закон распределения* часто называют законом Гаусса. Этот закон играет важную роль и наиболее часто используется на практике по сравнению с другими законами распределения.

Основная особенность этого закона состоит в том, что он является *предельным законом*, к которому приближаются другие законы распределения. В теории надежности его используют для описания постепенных отказов, когда распределение времени безотказной работы в начале имеет низкую плотность, затем максимальную и далее плотность снижается.

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

Нормальный закон распределения описывается плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.8)$$

где  $e = 2,71828$  — основание натурального логарифма;  $\pi = 3,14159$ ;  $m$  и  $\sigma$  — параметры распределения, определяемые по результатам испытаний.

Колоколообразная кривая плотности распределения приведена на рис. 3.2.

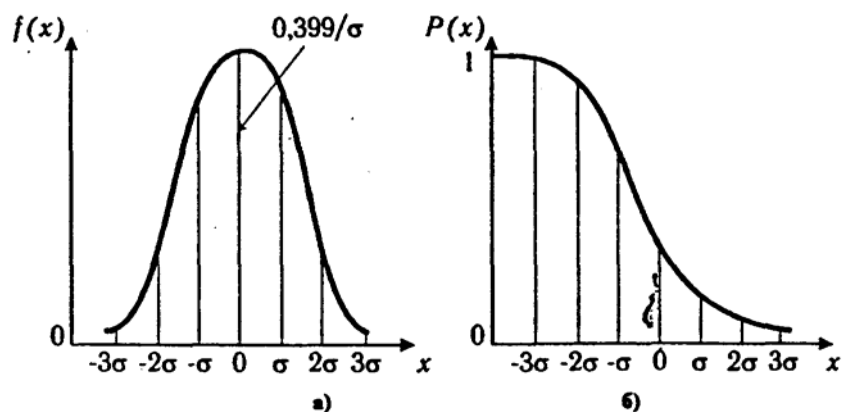


Рис. 3.2. Кривые плотности вероятности (а) и функции надежности (б) нормального распределения

Параметр  $m = M_x$  представляет собой среднее значение случайной величины  $X$ , оцениваемое по формуле

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (3.9)$$

параметр  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение случайной величины  $X$ , оцениваемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2}. \quad (3.10)$$

Интегральная функция распределения имеет вид

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx; \quad (3.11)$$

вероятность отказа и вероятность безотказной работы соответственно  $Q(x) = F(x)$ ,  $P(x) = 1 - F(x)$ .

Вычисление интегралов заменяют использованием таблиц нормального распределения, при котором  $M_x = 0$  и  $\sigma = 1$ . Для этого распределения функция плотности вероятности имеет одну переменную  $t$  и выражается зависимостью

$$f_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (3.12)$$

Величина  $t$  является центрированной (так как  $M_t = 0$ ) и нормированной (так как  $\sigma_t = 1$ ).

Функция распределения соответственно запишется в виде:

$$F_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3.13)$$

Из этого уравнения следует, что  $F_0(t) + F_0(-t) = 1$  или  $F_0(-t) = 1 - F_0(t)$ .

При использовании табл. 1 приложения следует в формулу (3.13) вместо  $t$  подставить ее значение:

$$t = \frac{(x - M_x)}{\sigma};$$

при этом  $t$  называют *квантилью нормированного нормального распределения* (обычно обозначают  $u_p$ ).

Плотность распределения и вероятность отказа соответственно равны:  $f(x) = f_0(t)/\sigma; Q(x) = F_0(t)$ ; тогда вероятность безотказной работы  $P(x) = 1 - F_0(t)$ , где  $f_0(t)$  и  $F_0(t)$ , определяют по таблицам.

В табл. 1 приложения приведены значения  $\Phi^*(x)$  в зависимости от  $t = x = \frac{x - M_x}{\sigma}$ .

В работах по надежности часто вместо интегральной функции распределения  $F_0(t)$  используют функцию Лапласа:

$$\Phi^*(x) = \int_0^t f_0(t) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-t^2/2} dt. \quad (3.14)$$

Очевидно, что

$$F_0(t) = \int_{-\infty}^0 f_0(t) dt + \int_0^t f_0(t) dt = 0,5 + \Phi^*(t) \quad (3.15)$$

Вероятности отказа и безотказной работы, выраженные через функцию Лапласа:

$$Q(x) = 0,5 + \Phi^*\left(\frac{x - M_x}{\sigma}\right), P(x) = 0,5 - \Phi^*\left(\frac{x - M_x}{\sigma}\right). \quad (3.16)$$

Вероятность попадания случайной величины  $X$  в заданный интервал значений от  $\alpha$  до  $\beta$  вычисляют по формуле

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi^*\left(\frac{\beta - M_x}{\sigma}\right) - \Phi^*\left(\frac{\alpha - M_x}{\sigma}\right). \quad (3.17)$$

**Пример 3.3.** Определить вероятность безотказной работы в течение  $t = 2 \cdot 10^4$  ч подшипника скольжения, если ресурс по износу подчиняется нормальному закону распределения с параметрами  $M_t = 4 \cdot 10^4$  ч,  $\sigma = 10^4$  ч.

**Решение.** Находим квантиль

$$u_p = \frac{t - M_t}{\sigma} = \frac{2 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4}{10^4} = -2.$$

По табл. П.1 приложения определяем, что  $P(t) = 0,0228$ .

**Пример 3.4.** Пусть случайная величина  $X$  представляет собой предел текучести стали. Опытные данные показывают, что предел текучести имеет нормальное распределение с параметрами  $M = 650$  МПа,  $\sigma = 30$  МПа. Найти вероятность того, что полученная плавка стали имеет предел текучести в интервале 600 — 670 МПа.

**Решение.** Для определения вероятности воспользуемся формулой (3.17)

$$P(600 < X < 670) = \Phi^*\left(\frac{670 - 650}{30}\right) - \Phi^*\left(\frac{600 - 650}{30}\right) = 0,697.$$

**Пример 3.5.** Случайная величина  $X$  распределена по нормальному закону и представляет собой ошибку измерения датчика давления. При измерении датчик имеет систематическую ошибку в сторону завышения на 0,5 МПа, среднее квадратическое отклонение ошибки измерения составляет 0,2 МПа.

Найти вероятность того, что отклонение измеряемого значения от истинного не превысит по абсолютной величине 0,7 МПа.

**Решение.** По формуле (3.17) с использованием табл. П.1 приложения определим

$$P(0,2 < X < 0,7) = \Phi^*\left(\frac{0,7 - 0,5}{0,2}\right) - \Phi^*\left(\frac{0,2 - 0,5}{0,2}\right) = 0,77.$$



Ответ:  $P(X) = 0,77$ .

### 3.4. Логарифмически нормальное распределение

Логарифмически нормальное распределение нашло широкое применение в вопросах техники, биологии, экономики и теории надежности. Его успешно применяют для описания наработки до отказа подшипников, электронных ламп и других изделий.

Неотрицательная случайная величина распределена *логарифмически нормально*, если ее логарифм распределен нормально. Плотность распределения для различных значений  $\sigma$  приведена на рис. 3.3.

Плотность распределения описывается зависимостью

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - M)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.18)$$

где  $M$  и  $\sigma$  — параметры, оцениваемые по результатам  $n$  испытаний до отказа;

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i; \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - M)^2}. \quad (3.19)$$

Для логарифмически нормального закона распределения функция надежности выглядит так:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\ln(x/M)}{\sigma}} \int_0^{\frac{\ln(x/M)}{\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (3.20)$$

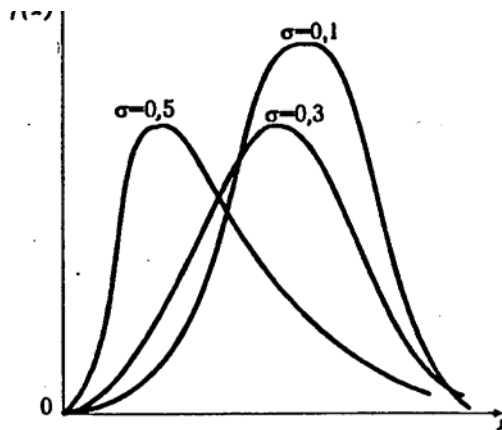


Рис. 3.3. Плотность логарифмически нормального распределения

Вероятность безотказной работы можно определить по таблицам для нормального распределения (см. табл. П.1 приложения) в зависимости от значения квантили

$$u_p = \frac{\ln x - M}{\sigma}.$$

Математическое ожидание наработки до отказа

$$M_x = e^{(M + \sigma^2 / 2)}. \quad (3.21)$$

Среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации соответственно равны:

$$\sigma_x = \sqrt{e^{2M + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)}. \quad (3.22)$$

$$v_x = \frac{\sigma_x}{M_x} = \sqrt{e^{\sigma^2} - 1}. \quad (3.23)$$

При  $v_x \leq 0,3$  полагают, что  $v_x = \sigma$ , при этом ошибка не более 1%.

Часто применяют запись зависимостей для логарифмически нормального закона в десятичных логарифмах. В соответствии с этим законом плотность распределения

$$f(x) = \frac{0,4343}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg x - \lg x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.24)$$

Оценки параметров  $\lg x_0$  и  $\sigma$  определяют по результатам испытаний:

$$\lg x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg x_i - \lg x_0)^2}. \quad (3.25)$$

Математическое ожидание  $M_x$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x$  и коэффициент вариации  $v_x$  наработки до отказа соответственно равны:

$$M_x = x_0 e^{2,65\sigma^2}; \quad (3.26)$$

$$\sigma_x = M_x \sqrt{\left(\frac{M_x}{x_0}\right)^2 - 1}; \quad (3.27)$$

$$v_x = \sqrt{\left(\frac{M_x}{x_0}\right)^2 - 1} \quad (3.28)$$

**Пример 3.6.** Определить вероятность безотказной работы редуктора в течение  $t=10^3$ ч, если ресурс распределен логарифмически нормально с параметрами  $\lg t_0 = 3,6$ ,  $\sigma = 0,3$ .

Решение. Найдем значение квантили и по ней определим вероятность безотказной работы (табл. П.1 приложения):

$$u_p = \frac{\lg t - \lg t_0}{\sigma} = \frac{\lg 10^3 - 3,6}{0,3} = -2;$$

$$P(t) = \Phi_0(u_p) = \Phi_0(-2) = 0,0228.$$

Ответ:  $P(t)=0,0228$ .

### 3.5. Распределение Вейбулла

*Закон Вейбулла* представляет собой *двухпараметрическое распределение*. Этот закон является универсальным, так как при соответствующих значениях параметров превращается в нормальное, экспоненциальное и другие виды распределений. Автор данного закона использовал его при описании экспериментально наблюдавшихся разбросов усталостной прочности стали, пределов ее упругости. Закон Вейбулла удовлетворительно описывает наработку до отказа подшипников, элементов радиоэлектронной аппаратуры, его используют для оценки надежности деталей и узлов машин, в частности автомобилей, а также для оценки надежности машин в процессе их приработки. Плотность распределения описывается зависимостью

$$f(x) = \alpha \lambda x^{\alpha-1} \exp(-\lambda x^\alpha), \quad (3.29)$$

где  $\alpha$  — параметр формы кривой распределения;  $\lambda$  — параметр масштаба;  $e = 2,71828$  — основание натурального логарифма.

График плотности распределения дан на рис. 3.4.

Функция распределения Вейбулла

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x^\alpha). \quad (3.30)$$

Функция надежности для этого закона:

$$P(x) = \exp(-\lambda x^\alpha) \quad (3.31)$$

Математическое ожидание случайной величины  $X$  равно:

$$M_x = \Gamma(1 + 1/\alpha) \lambda^{-1/\alpha}, \quad (3.32)$$

где  $\Gamma(x)$  — гамма-функция. Для непрерывных значений  $x$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt. \quad (3.33)$$

Для целочисленных значений  $x$  гамма-функцию вычисляют по формуле

$$\Gamma(x) = (x-1)!; \quad (3.34)$$

$$\Gamma(x-1/2) = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2x-3) \pi^{1/2} / 2^x. \quad (3.35)$$

$$\Gamma(x+1/2) = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2x-1) \pi^{1/2} / 2^x. \quad (3.36)$$

Дисперсия случайной величины равна:

$$D_x = \lambda^{-2/\alpha} [\Gamma(1+2/\alpha) - \Gamma^2(1+1/\alpha)]. \quad (3.37)$$

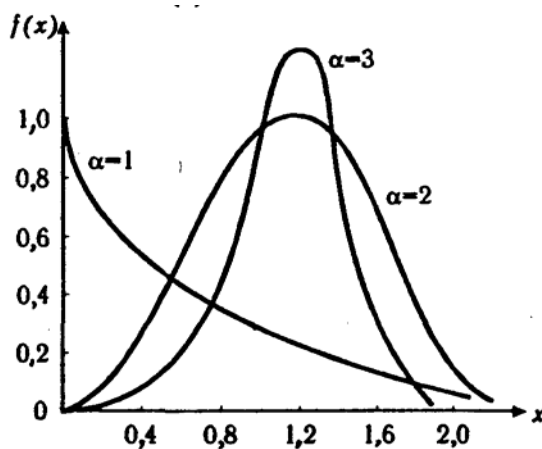


Рис. 3.4. Плотность распределения Вейбулла для  $\lambda=1$

Широкое применение закона распределения Вейбулла объясняется тем, что этот закон, обобщая экспоненциальное распределение, содержит дополнительный параметр  $\alpha$ . Подбирая нужным образом параметры  $\alpha$  и  $\lambda$ , можно получить лучшее соответствие расчетных значений опытными данными по сравнению с экспоненциальным законом, который является однопараметрическим (параметр  $\lambda$ ).

Так, для изделий, у которых имеются скрытые дефекты, но которые длительное время не стареют, опасность отказа имеет наибольшее значение в начальный период, а потом быстро падает. Функция надежности для такого изделия хорошо описывается законом Вейбулла с параметром  $\alpha < 1$ .

Наоборот, если изделие хорошо контролируется при изготовлении и почти не имеет скрытых дефектов, но подвергается быстрому старению, то функция надежности описывает-

ся законом Вейбулла с параметром  $\alpha > 1$ . При  $\alpha = 3.3$  распределение Вейбулла близко к нормальному.

### 3.6. Гамма-распределение

Гамма-распределение является двухпараметрическим распределением. Оно занимает важное место в теории надежности. Плотность распределения имеет ограничение с одной стороны ( $0 \leq x < \infty$ ). Если параметр  $\alpha$  формы кривой распределения принимает целое значение, то это свидетельствует о вероятности появления такого же числа событий (например, отказов) при условии, что они независимы и появляются с постоянной интенсивностью  $\lambda$ . Гамма-распределение широко применяют при описании появления отказов стареющих элементов, времени восстановления, наработки на отказ резервированных систем. При различных параметрах гамма-распределение принимает разнообразные формы, что и объясняет его широкое применение.

Плотность вероятности гамма-распределения определяется равенствами

$$f(x) = [\lambda^\alpha / \Gamma(\alpha)] x^{\alpha-1} e^{-\lambda x} \quad \text{при } x \geq 0; \quad (3.38)$$

$$f(x) = 0 \quad \text{при } x < 0,$$

где  $\lambda > 0, \alpha > 0$ ;

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx. \quad (3.39)$$

Кривая изменения плотности распределения приведена на рис. 3.5.

Функция распределения

$$F(x) = \lambda^\alpha / \Gamma(\alpha) \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\lambda x} dx \quad \text{при } x \geq 0; \quad (3.40)$$

$$F(x) = 0 \quad \text{при } x < 0.$$

Математическое ожидание и дисперсия соответственно равны:

$$M_x = \alpha / \lambda; \quad D_x = \alpha / \lambda^2. \quad (3.41)$$

При  $\alpha < 1$  интенсивность отказов монотонно убывает (что соответствует периоду приработки изделия), при  $\alpha > 1$  — возрастает (что характерно для периода изнашивания и старения элементов).

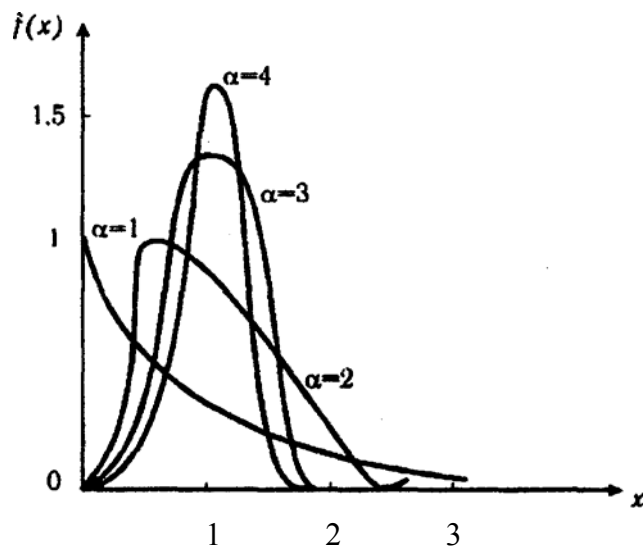


Рис. 3.5. Кривые плотности гамма-распределения

При  $\alpha = 1$  гамма-распределение совпадает с экспоненциальным распределением, при  $\alpha > 10$  гамма-распределение приближается к нормальному закону. Если  $\alpha$  принимает значения произвольных целых положительных чисел, то такое гамма-распределение называют *распределением Эрланга*. Если  $\lambda = 1/2$ , а значение  $\alpha$  кратно  $1/2$ , то гамма-распределение совпадает с распределением  $\chi^2$  (хи-квадрат).

### 3.7. Установление функции распределения показателей надежности по данным статистической информации

Наиболее полной характеристикой надежности сложной системы является *закон распределения*, выраженный в виде функции распределения, плотности распределения или функции надежности. О виде теоретической функции распределения можно судить по эмпирической функции распределения (рис. 3.6), которая определяется из соотношения

$$F_i = m_i/N \quad (3.42)$$

где  $m_i$  - число отказов на интервале  $t$ ;  $N$  — объем испытаний;  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$  - интервал времени, на котором определяют эмпирическую функцию.

Построение эмпирической функции осуществляют, суммируя приращения, полученные на каждом интервале:

$$F(t) = \sum_{i=1}^k m_i/N, \quad (3.43)$$

где  $k$  - число интервалов.

Эмпирическая функция надежности является функцией, противоположной функции распределения; ее определяют по формуле

$$P_i(t) = 1 - m_i/N. \quad (3.44)$$

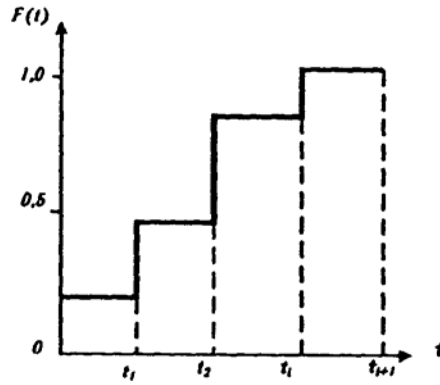


Рис. 3.6. Эмпирическая функция распределения

Оценку плотности вероятности находят по *гистограмме*. Построение гистограммы сводится к следующему. Всю область значений времени  $t$  разбивают на интервалы  $t_1, t_2, \dots, t_i$  и для каждого из этих интервалов определяют оценку плотности вероятности по формуле

$$f^*(t) = m_i / [N(t_{i+1} - t_i)], \quad (3.45)$$

где  $m_i$  - число отказов на  $i$ -м интервале;  $(t_{i+1} - t_i)$  - отрезок времени  $i$ -го интервала;  $N$  — объем испытаний;  $i = 1, 2, \dots, k$  - число интервалов.

Графически гистограмма может иметь вид, изображенный на рис. 3.7.

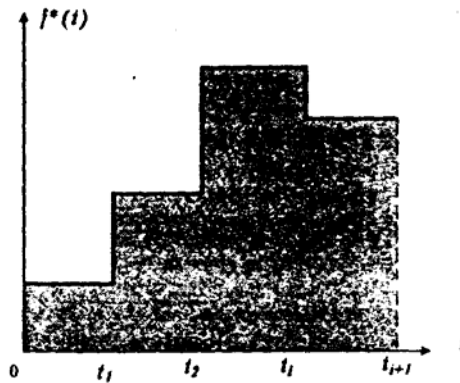


Рис. 3.7. Гистограмма.

Сглаживая ступенчатую гистограмму плавной кривой, можно по ее виду судить о законе распределения случайной величины. В практике для сглаживания кривой чаще всего используют *метод наименьших квадратов*. Для более точного установления закона распределения необходимо, чтобы число интервалов было не менее пяти, а число реализаций, попадающих в каждый интервал, - не менее десяти.

Графическое определение вида функции состоит в нанесении полученных экспериментальных данных на *вероятностную бумагу*, представляющую собой лист бумаги, на котором в прямоугольной системе координат нанесена сетка, при этом по оси ординат - шкала, соответствующая функции закона распределения (например, нормального, логарифмически-нормального и т.д.), а по оси абсцисс - линейная или логарифмическая шкала. Основная идея графического метода построения - подбор такой непрерывной замены координат, при которой график функции распределения становится прямой линией. Если такую замену переменных удалось отыскать, то на плоскости координат любая функция распределения этого семейства будет прямой линией (рис. 3.8)

$$U_F = U[F(t, \alpha, \lambda)] = a(\alpha, \lambda)t + b(\alpha, \lambda), \quad (3.46)$$

где  $F(t, \alpha, \lambda)$  - функция распределения, содержащая два неизвестных параметра.

Вероятностная бумага может быть использована не только для определения вида распределения, но и для нахождения параметров закона распределения. Оценки параметров закона распределения находят по углу наклона прямой и отрезкам, которые она отсекает на осях координат, для чего решают систему уравнений:

$$\begin{aligned} k &= a(\alpha, \lambda), \\ c &= b(\alpha, \lambda), \end{aligned} \quad (3.47)$$

где  $k = \operatorname{tg}(\varphi)$  - тангенс угла наклона прямой линии к оси абсцисс;  $c$  - длина отрезка от точки пересечения прямой с осью абсцисс до оси ординат.

Если опытные точки располагаются на вероятностной бумаге близко к прямой, то это свидетельствует о соответствии опытных данных тому закону распределения, для которого построена вероятностная бумага.

Для нормального закона распределения справедливо следующее уравнение прямой:

$$U_F = t/\sigma - \mu/\sigma, \quad (3.48)$$

где  $\mu$  и  $\sigma$  - параметры распределения.

При построении вероятностной бумаги для этого распределения на горизонтальной оси откладывают равномерную шкалу для  $t$ , а на вертикальной оси - значения  $U_F$  и надписывают величину  $F(t)$ , поэтому шкала на вертикальной оси получается неравномерной. Область изменения  $t$  определяется разностью:

$$\Delta t = t_{\max} - t_{\min}. \quad (3.49)$$

Если за ширину графика принять величину  $L$  [мм], то откладываемые на горизонтальной оси значения  $t$  рассчитывают с помощью соотношения

$$S_t = K_t t, \quad (3.50)$$

где

$$K_t = L/\Delta t. \quad (3.51)$$

Для построения шкалы функции распределения  $F(t)$  задаются ее минимальным  $[F_{\min}(t)]$  и максимальным  $[F_{\max}(t)]$  значениями, например  $F_{\min}(t) = 0,001$ ,  $F_{\max}(t) = 0,999$ . Тогда для  $U_F$  наименьшее значение будет  $U(F_{\min}) = -3,09$ , а наибольшее  $U(F_{\max}) = 3,09$ . Поэтому уравнение для  $S_F$  при длине шкалы  $L = 300$  мм записывают в следующем виде:

$$S_F = (U_F/6,18)300 = 48,5 U_F. \quad (3.52)$$

Из уравнения (3.48) следует, что при  $F(t) = 0,5$ ,  $U_F = 0$ , а при  $F(t) < 0,5$  используют соотношение

$$S_{F=} = -S_{1-F}. \quad (3.53)$$

На рис. 3.8 дан график функции распределения на вероятностной бумаге. Прямая пересекает ось  $t$  в точке  $\mu$  (это следует из уравнения (3.48)).

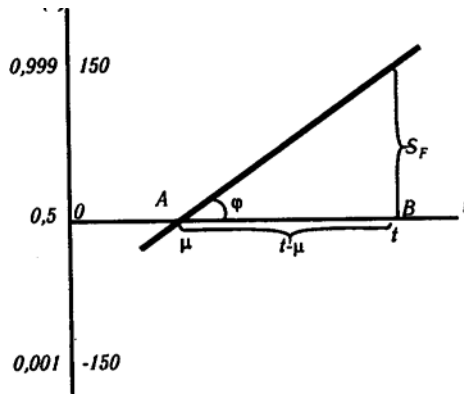


Рис. 3.8. График функции нормального распределения на вероятностной бумаге

Для определения параметра  $\sigma$  воспользуемся уравнениями (3.48), (3.50) и (3.52). Из этих уравнений следует

$$\sigma = (t - \mu)/U_F = AB \cdot 48,5/K_t S_F, \quad (3.54)$$

где  $AB$  - длина отрезка, равная  $t - \mu$ , мм.

Из уравнения (3.54) и в соответствии с рис. 3.8 получим

$$\sigma = (48,5/K_t) \operatorname{ctg} \varphi. \quad (3.55)$$

Значение  $K_t$  известно, а  $\operatorname{ctg} \varphi$  находят по графику.

При построении вероятностной бумаги для экспоненциального закона преобразуем уравнение функции распределения

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (3.56)$$

к линейному виду

$$-\ln[1 - F(t)] = \lambda t. \quad (3.57)$$

Вероятностную бумагу для экспоненциального распределения (рис.3.9) строят следующим образом: на горизонтальной оси откладывают равномерную шкалу для  $t$ , на вертикальной оси - значения, определяемые по формуле (3.57), и надписывается  $F(t)$ . Наименьшее значение  $F_{\min}(t) = 0$ , наибольшее примем равным  $F_{\max}(t) = 0,999$ . Тогда для  $-\ln[1 - F(t)]$  получаем наибольшее значение 6,908. Поэтому уравнение для  $S_F$  запишем в таком виде

$$S_F = -300 \ln[1 - F(t)]/6,908 = -43,4 \ln[1 - F(t)]. \quad (3.58)$$

Параметр  $\lambda$  находим по уравнению

$$\lambda = -\ln[1 - F(t)]/t = S_F K_t / (43,4 S_t) = (K_t / 43,4) \operatorname{tg} \varphi. \quad (3.59)$$

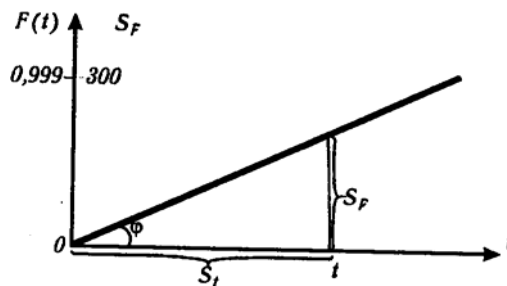


Рис. 3.9. Функция экспоненциального распределения на вероятностной бумаге



При построении вероятностной бумаги для закона распределения Вейбулла (рис.3.10) функция

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda^\alpha t^\alpha) \quad (3.60)$$

преобразуется к линейному виду

$$y = \ln\{\ln[1 - F(t)]\} = \alpha \ln(\lambda t) = 2,303 \alpha [\lg t - \lg(1/\lambda)]. \quad (3.61)$$

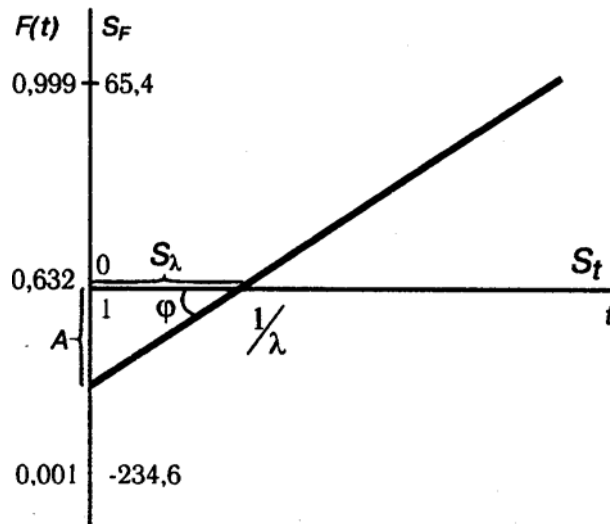


Рис. 3.10. График функции распределения Вейбулла на вероятностной бумаге

На горизонтальной оси откладывают логарифмическую шкалу в соответствии с уравнением

$$S_t = K_t \lg t, \quad (3.62)$$

где  $K_t$  - масштабный фактор.

На вертикальной оси откладывают значения  $y$ , а надписывают величину  $F(t)$ . Примем для  $F(t)$  крайние значения: 0,001 и 0,999. Для этих значений  $y_{\min} = -6,91$  и  $y_{\max} = 1,93$ , т.е. *размах величины*  $y$  равен 8,84. Поэтому уравнение для  $S_F$  имеет вид

$$S_F = 300 y / 8,84 = 33,94 y. \quad (3.63)$$

Следует подчеркнуть, что при  $F(t) < 0,6321$  имеем  $S_F < 0$  и при  $F(t) > 0,6321$  имеем  $S_F > 0$ .

Из уравнения (3.63) следует, что  $y = 0$  при  $t = 1/\lambda$ . Поэтому значение  $1/\lambda$  находят в точке пересечения графика с осью  $t$ .

Параметр  $\alpha$  находят при решении уравнения

$$\alpha = K_t \operatorname{tg} \varphi / 78,16. \quad (3.64)$$

При построении вероятностной бумаги для других законов распределения используют изложенный выше метод.

#### 4. Математические зависимости для оценки надежности

##### 4.1. Функциональные зависимости надежности

Отказы, возникающие в процессе испытаний или эксплуатации, могут быть вызваны неблагоприятным сочетанием различных факторов — рассеянием действующих нагрузок, отклонением от номинального значения механических характеристик материалов, неблагоприятным сочетанием допусков в местах сопряжения и т. п. Поэтому в расчетах надежности различные параметры рассматривают как случайные величины, которые могут принимать то или иное значение, неизвестное заранее.

Различают случайные величины *прерывного* (дискретного) и *не-прерывного* типов. Условимся случайные величины в дальнейшем обозначать большими буквами, а их возможные значения — соответствующими малыми. Для каждого числа  $x$  в диапазоне изменения случайной величины  $X$  существует определенная вероятность  $P(X < x)$  того, что  $X$  не превышает значения  $x$ . Вероятность этого события называют *функцией распределения*:

$$F(x) = P(X < x). \quad (4.1)$$

Функция распределения — универсальная характеристика, так как она является функцией как непрерывных, так и дискретных случайных величин. Функция  $F(x)$  относится к неубывающим функциям —  $x$  монотонно возрастает при непрерывных процессах и ступенчато возрастает при дискретных процессах. В пределах изменения случайной величины  $X$  эта функция изменяется от 0 до 1:  $F(-\infty) = 0$ ;  $F(\infty) = 1$ ;

Производную от функции распределения по текущей переменной называют *плотностью распределения*

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}, \quad (4.2)$$

которая характеризует частоту повторений данного значения случайной величины. В теории надежности величину  $f(x)$  называют *плотностью вероятности*. Плотность распределения есть неотрицательная функция своего аргумента  $f(x) \geq 0$ .

Интеграл в бесконечных пределах от плотности распределения равен единице:

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

В ряде случаев в качестве характеристик распределения случайных величин достаточно использовать некоторые числовые величины, среди которых в теории надежности наиболее употребительными являются математическое ожидание (среднее значение), мода и медиана (характеризуют положение центров группирования случайных величин на числовой оси), дисперсия, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации (характеризуют рассеяние случайной величины). Значения характеристик, полученные по результатам испытаний или эксплуатации, называют *статистическими оценками*. Характеристики распределения используют для прогнозирования надежности.

Для дискретных случайных величин *математическое ожидание*  $M_x$  равно сумме произведений всех возможных значений  $X$  на вероятности этих значений:

$$M_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (4.3)$$

Математическое ожидание для непрерывной случайной величины выражается интегралом в бесконечных пределах от произведения непрерывно изменяющихся возможных значений случайной величины на плотность распределения

$$M_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \quad (4.4)$$

Математическое ожидание случайной величины непосредственно связано с ее средним значением. При неограниченном увеличении числа опытов среднее арифметическое значе-

ние величины  $x$  приближается к математическому ожиданию и называется *оценкой среднего значения*:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.5)$$

где  $n$  - общее число опытов;  $x_i$  - текущее значение случайной величины.

*Дисперсией* ( $D$ ) *случайной величины* называют математическое ожидание квадрата отклонения этой величины от ее математического ожидания.

Для дискретной случайной величины дисперсия равна:

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2 p_i \quad (4.6)$$

Для непрерывной случайной величины дисперсия определяется из выражения

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_x)^2 f(x) dx. \quad (4.7)$$

Оценка дисперсии случайной величины:

$$D_x^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (4.8)$$

Дисперсия случайной величины является характеристикой *рассеяния* — разбросанности значений случайной величины около ее математического ожидания. *Размерность дисперсии* соответствует квадрату размерности случайной величины. Для наглядности в качестве характеристики рассеяния удобнее использовать величину, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины. Такой характеристикой может быть *среднее квадратическое отклонение*  $\sigma_x$ , которое определяется как корень квадратный из дисперсии:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (4.9)$$

Для оценки рассеяния с помощью безразмерной величины используют *коэффициент вариации*, который равен:

$$v_x = \frac{\sigma_x}{M_x}. \quad (4.10)$$

*Модой* случайной величины называют ее наиболее вероятное значение или то ее значение, при котором плотность вероятности максимальна.

*Медиана* характеризует расположение *центра группирования случайной величины*. Площадь под графиком функции плотности распределения делится медианой пополам.

*Квантиль* — значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности. Квантиль, соответствующую вероятности 0,5, называют медианой.

Аналогично предыдущим характеристикам понятия моды и медианы даны в статистической трактовке. Для *симметричного модального* (т.е. имеющего один максимум) *распределения* математическое ожидание, мода и медиана совпадают.

**Пример 4.1.** Функция распределения непрерывной случайной величины  $X$  задана выражением

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0; \\ ax^3 & \text{при } 0 < x \leq 1; \\ 1 & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

Найти коэффициент  $a$  и плотность распределения  $f(x)$ .

**Решение.** Так как функция распределения случайной величины  $X$  непрерывна, то при  $x=1$ ,  $ax^3 = 1$ , откуда  $a = 1$ .

Плотность распределения выражается соотношением

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0; \\ 3x^2 & \text{при } 0 < x \leq 1; \\ 0 & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

**Пример 4.2.** Плотность распределения случайной величины  $X$  описывается выражением

$$f(x) = \begin{cases} ax & \text{при } 0 \leq x \leq 1; \\ 0 & \text{при } x < 0 \text{ или } x > 1. \end{cases}$$

Найти математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной величины.

**Решение.** Математическое ожидание найдем по формуле (4.4):

$$M_x = \int_0^1 xf(x)dx = \int_0^1 xaxdx = \frac{a}{3}.$$

Для определения дисперсии используем формулу (4.7):

$$D_x = \int_0^1 \left(x - \frac{a}{3}\right)^2 axdx = a \left(\frac{1}{4} - \frac{2a}{9} + \frac{a^2}{18}\right).$$

Среднее квадратическое отклонение соответственно равно:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} = \sqrt{a \left(\frac{1}{4} - \frac{2a}{9} + \frac{a^2}{18}\right)}.$$

**Пример 4.3.** При проведении одного опыта может появиться или не появиться некоторое событие  $A$ . Вероятность появления события  $A$  равна  $p$ , а вероятность не появления этого события -  $1-p = q$ .

Определить математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной величины  $X$  — число появлений события  $A$ .

**Решение.** Ряд распределения случайной величины  $X$  можно записать в виде таблицы:

$x_i$	0	1
$P_i$	$q$	$p$

По формуле (4.3) находим математическое ожидание:

$$M_x = \sum_{i=0}^1 x_i p_i = 0q + 1p = p.$$

Дисперсию величины  $X$  определим по формуле (4.6).

$$D_x = \sum_{i=0}^1 (x_i - M_x)^2 p_i = pq.$$

Среднее квадратическое отклонение равно:

$$\sigma_x = \sqrt{D} = \sqrt{pq}.$$

Рассматривая случаи появления или отсутствия события  $A$  в большом числе испытаний, можно установить определенные закономерности появления этого события. Если при проведении  $n_1$  испытаний событие  $A$  имело место  $m_1$  раз, то *относительную частоту* появления события  $A$  определяют из соотношения

$$P^*(A) = \frac{m_1}{n_1}. \quad (4.11)$$

Если событие  $A$  имело место в каждом из  $n_1$  испытаний, т. е.  $m_1 = n_1$ , то  $P^*(A)=1$ . Если событие  $A$  не наступило ни в одном из  $n_1$  испытаний, т. е.  $m_1=0$ , то  $P^*(A)=0$ . При проведении серии последовательных испытаний получим соотношения:

$$P_1^* = \frac{m_1}{n_1}; P_2^* = \frac{m_2}{n_2}; \dots; P_i^* = \frac{m_i}{n_i}.$$

Относительная частота становится более устойчивой при увеличении числа испытаний. Такая закономерность была замечена давно и подтверждена результатами решения различных примеров. Самыми известными примерами являются примеры бросания монеты или игральной кости. Так, при большом числе бросаний монеты относительная частота выпадания герба равна  $1/2$  и равна относительной частоте выпадания цифры. При большом числе бросаний игральной кости относительная частота выпадания каждой стороны, на которой изображены цифры от 1 до 6, равна  $1/6$ .

Приведенные примеры показывают, что существует постоянная величина (в нашем случае  $1/2$  или  $1/6$ ), около которой колеблется относительная частота свершения случайного события и к которой она все более приближается с увеличением числа испытаний. Постоянную величину, к которой приближается относительная частота случайного события, называют *вероятностью случайного события  $A$*  и обозначают символом  $P(A)$ . На практике при большом числе испытаний вероятность случайного события приближенно принимают равной относительной частоте этого события:

$$P(A) \approx P^*(A).$$

Математическим основанием этого утверждения является *закон больших чисел* (Я. Бернулли) - вероятность отклонения относительной частоты некоторого события  $A$  от вероятности  $P(A)$  этого события более чем на произвольно заданную величину  $\varepsilon > 0$  становится сколь угодно малой, если число испытаний  $n$  неограниченно возрастает.

Таким образом, вероятность события  $P(A)$  представляет собой число, заключенное в интервале от нуля до единицы, т. е. справедливо неравенство

$$0 \leq P(A) \leq 1. \quad (4.12)$$

**Пример 4.4.** Пусть проводится стрельба из артиллерийского орудия по щиту. В результате проведения 500 выстрелов число попаданий оказалось равным 450. Найти вероятность попадания по щиту при одном выстреле.

**Решение.** Общее число проведенных опытов  $n = 500$ , при этом число попаданий  $m = 450$ .

Используя формулу (4.11), найдем вероятность попадания:  $P(A) = 0,9$ .

**Ответ:**  $P(A) = 0,9$ .

## 4.2. Теорема сложения вероятностей

События могут быть совместными и несовместными. Два события называют *несовместными*, если в результате опыта они не могут появиться одновременно. И наоборот, события считаются *совместными*, если они появляются одновременно в результате такого опыта.

*Вероятность суммы двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий*

$$P(A+B)=P(A)+P(B). \quad (4.13)$$

*Метод полной индукции* позволяет использовать теорему сложения для произвольного числа несовместных событий. Так, *вероятность суммы нескольких событий* равна сумме вероятностей этих событий

$$P(A_1+A_2+\dots+A_n)=P(A_1)+P(A_2)+\dots+P(A_n). \quad (4.14)$$

Более удобная запись теоремы сложения:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i). \quad (4.15)$$

**С л е д с т в и е 1.** Если события  $A_1, A_2, \dots, A_n$  образуют полную группу несовместных событий, то сумма их вероятностей равна единице:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1. \quad (4.16)$$

*Противоположными событиями* называют два несовместных события, образующих полную группу.

**С л е д с т в и е 2.** Сумма вероятностей противоположных событий равна единице:

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad (4.17)$$

где  $\bar{A}$  — событие, противоположное событию  $A$ .

*Вероятность суммы двух совместных событий  $A$  и  $B$*  выражается формулой

$$P(A+B)=P(A)+P(B) - P(AB). \quad (4.18)$$

Аналогично *вероятность суммы трех совместных событий* определяется выражением

$$P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(AB) - P(AC) - P(BC) + P(ABC). \quad (4.19)$$

*Вероятность суммы любого числа совместных событий* определяется выражением

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i A_j A_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 A_2 \dots A_n). \quad (4.20)$$

Формула (4.20) выражает вероятность суммы любого числа событий через вероятности произведений этих событий, взятых по одному, по два, по три и т. д.

Аналогичную формулу можно написать для *произведения двух событий*:

$$P(AB)=P(A)+P(B)-P(A+B); \quad (4.21)$$

для *произведения трех событий*:

$$P(ABC)=P(A)+ P(B)+ P(C) -P(A + B) -P(A + C) -P(B+C)+P(A +B+C). \quad (4.22)$$

Общая формула, выражающая *вероятность произведения произвольного числа событий* через вероятности сумм этих событий, взятых по одному, по два, по три и т. д., имеет вид:

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i + A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i + A_j + A_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 + A_2 + \dots + A_n). \quad (4.23)$$

Формулы (4.20) и (4.23) находят практическое применение при преобразовании различных выражений, содержащих вероятности сумм и произведений событий. В зависимости от специфики задачи в некоторых случаях удобнее бывает использовать только суммы, а в других только произведения событий.

**Пример 4.5.** Пусть проводится стрельба из артиллерийского орудия по щиту с двумя зонами попадания. Вероятность попадания в первую зону при одном выстреле равна 0,40, во вторую 0,35. Найти вероятность промаха.

**Р е ш е н и е.** Обозначим через  $A$  — попадание, а через  $\bar{A}$  — промах. Тогда событие  $A = A_1 + A_2$ , где  $A_1$  и  $A_2$  — попадания соответственно в первую и вторую зоны. Используя формулу (4.14), найдем

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2) = 0,40 + 0,35 = 0,75.$$

Тогда  $P(\bar{A}) = 1 - P(A) = 1 - 0,75 = 0,25$ .

Ответ:  $P(\bar{A}) = 0,25$ .

**Пример 4.6.** Техническое устройство состоит из трех элементов  $A_1$ ,  $A_2$  и  $B$ . Элементы  $A_1$  и  $A_2$  дублируют друг друга. Это означает, что при отказе одного из них происходит автоматическое переключение на второй. Элемент  $B$  не дублирован.

Устройство прекращает работу в том случае, когда отказывают оба элемента  $A_1$  и  $A_2$  либо отказывает элемент  $B$ . Таким образом, отказ устройства можно представить в виде события  $C = \bar{A}_1 \bar{A}_2 + B$ , где событие  $A_1$  является отказом элемента  $A_1$ ,  $A_2$  — отказом элемента  $A_2$  и  $B$  — отказом элемента  $B$ . Требуется выразить вероятность события  $C$  через вероятности событий, содержащих только суммы.

**Р е ш е н и е.** В соответствии с формулой (4.18) имеем

$$P(C) = P(\bar{A}_1 \bar{A}_2) + P(B) - P(\bar{A}_1 \bar{A}_2 B).$$

Используя формулу (4.21), определим

$$P(\bar{A}_1 \bar{A}_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 + A_2).$$

Далее, применяя формулу (4.22), получим

$$P(\bar{A}_1 \bar{A}_2 B) = P(A_1) + P(A_2) + P(B) - P(A_1 + A_2) - P(A_1 + B) - P(A_2 + B) + P(A_1 + A_2 + B).$$

Подставляя полученные выражения и сокращая, находим

$$P(C) = P(A_1 + B) + P(A_2 + B) - P(A_1 + A_2 + B).$$

О т в е т:  $P(C) = P(A_1 + B) + P(A_2 + B) - P(A_1 + A_2 + B)$ .

### 4.3. Теорема умножения вероятностей

События могут быть независимыми и зависимыми.

*Событие  $A$  называют независимым от события  $B$ , если вероятность события  $A$  не зависит от того, произошло событие  $B$  или нет.*

*Событие  $A$  называют зависимым от события  $B$ , если вероятность события  $A$  меняется в зависимости от того, произошло событие  $B$  или нет.*

Понятие зависимости и независимости событий можно наглядно показать на следующих примерах.

**Пример 4.7.** Предположим, что опыт состоит в бросании двух монет, при этом рассматривают следующие события: событие  $A$  — появление герба на первой монете и событие  $B$  — появление герба на второй монете.

В этом случае вероятность события  $A$  не зависит от того, произошло событие  $B$  или нет, следовательно, событие  $A$  независимо от события  $B$ .

**Пример 4.8.** Пусть в урне имеется два белых и один черный шар. Два человека вынимают из урны по одному шару, при этом рассматриваются следующие события: событие  $A$  — появление белого шара у первого человека и событие  $B$  — появление белого шара у второго человека.

Вероятность события  $A$  до того, как станет известно что-либо о событии  $B$ , равна  $2/3$ . Если стало известно, что событие  $B$  произошло, то вероятность события  $A$  становится равной  $1/2$ , из чего заключаем, что событие  $A$  зависит от события  $B$ .

Вероятность события  $A$ , вычисленная при условии, что имело место другое событие  $B$ , называется *условной вероятностью события  $A$*  и обозначается  $P(A/B)$ .

Для условий примера  $P(A) = 2/3$ ,  $P(A/B) = 1/2$ .

Теорема умножения вероятностей формулируется следующим образом.

*Вероятность произведения двух событий* равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место, т. е.

$$P(AB) = P(A)P(B/A). \quad (4.24)$$

Очевидно, что при применении теоремы умножения безразлично, какое из событий —  $A$  или  $B$  — считать первым, а какое вторым, и теорему можно записать так:

*Два события* называют *независимыми*, если появление одного из них не изменяет вероятности появления другого.

Понятие независимых событий может быть распространено на случай произвольного числа событий. *Несколько событий* называют *независимыми*, если любое из них не зависит от любой совокупности остальных.

*Вероятность произведения двух независимых событий* равна произведению вероятностей этих событий. Теорема умножения вероятностей может быть обобщена на случай произвольного числа событий. В общем виде она формулируется так.

*Вероятность произведения нескольких событий* равна произведению вероятностей этих событий, причем вероятность каждого следующего по порядку события вычисляют при условии, что все предыдущие имели место:

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1) P(A_2/A_1) P(A_3/A_1 A_2) \dots P(A_n/A_1 A_2 \dots A_{n-1}). \quad (4.25)$$

В случае независимых событий теорема упрощается и принимает вид:

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1) P(A_2) \dots P(A_n), \quad (4.26)$$

т. е. вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий.

Применяя знак произведения, теорему можно записать так:

$$P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (4.27)$$

**Пример 4.9.** Устройство состоит из пяти приборов, каждый из которых, независимо от других, может в течение времени  $t$  отказаться. Отказ хотя бы одного прибора приводит к отказу устройства. За время  $t$  вероятность безотказной работы каждого из приборов соответственно равна  $P_1(t)=0,95$ ;  $P_2(t)=0,99$ ;  $P_3(t)=0,98$ ;  $P_4(t)=0,90$ ;  $P_5(t)=0,93$ . Найти надежность устройства за время работы  $t$ .

**Решение.** Введем обозначения вероятностей безотказной работы первого - пятого приборов:  $A_1 - A_5$ .

Имеем:  $A = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5$ .

По формуле умножения для независимых событий (4.26) получим:

$$P(A) = P(A_1) P(A_2) P(A_3) P(A_4) P(A_5) = 0,95 * 0,99 * 0,98 * 0,90 * 0,93 = 0,76.$$

**Пример 4.10.** Производят три выстрела по одной и той же мишени. Вероятность попадания при первом - третьем выстрелах соответственно равна:  $P_1 = 0,8$ ;  $P_2 = 0,6$ ;  $P_3 = 0,3$ ; Найти вероятность того, что в результате этих трех выстрелов в мишени будет хотя бы одна пробоина.

**Решение.** Рассмотрим событие  $B$  - хотя бы одно попадание в мишень. Представим событие  $B$  в виде суммы несовместных вариантов:

$$B = A_1 A_2 A_3 + A_1 A_2 \bar{A}_3 + A_1 \bar{A}_2 A_3 + A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 + \bar{A}_1 A_2 A_3 + \bar{A}_1 A_2 \bar{A}_3 + \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3,$$



где  $A_1, A_2, A_3$  - попадания при первом - третьем выстрелах;  $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$  - промах при первом - третьем выстрелах.

Вероятность каждого варианта находим по теореме умножения, а затем используем теорему сложения:

$$\begin{aligned}
 P(B) = & P(A_1)P(A_2)P(A_3) + P(A_1)P(A_2)P(\bar{A}_3) + P(A_1)P(\bar{A}_2)P(A_3) + P(A_1)P(\bar{A}_2)P(\bar{A}_3) + \\
 & P(\bar{A}_1)P(A_2)P(A_3) + P(\bar{A}_1)P(A_2)P(\bar{A}_3) + \\
 & P(\bar{A}_1)P(\bar{A}_2)P(A_3) = 0,8*0,6*0,3+0,8*0,6*(1-0,3)+0,8*(1-0,6)*0,3+ \\
 & +(1-0,8)*0,6*0,3 + 0,8*(1-0,6)*(1-0,3) + (1-0,8)*0,6*(1-0,3) + \\
 & +(1-0,8)*(1-0,6)*0,3=0,946.
 \end{aligned}$$

#### 4.4. Формула полной вероятности

Следствием обеих основных теорем - теоремы сложения вероятностей и теоремы умножения вероятностей - является *формула полной вероятности*.

Пусть требуется определить вероятность некоторого события  $A$ , которое может произойти вместе с одним из событий:  $H_1, H_2, \dots, H_n$ , образующих полную группу несовместных событий, называемых гипотезами. Докажем, что в этом случае

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P(A/H_i), \quad (4.28)$$

т. е. вероятность события  $A$  вычисляется как сумма произведений вероятности каждой гипотезы на вероятность события при этой гипотезе.

Формулу (4.28) называют *формулой полной вероятности*, что можно доказать следующим образом.

Гипотезы  $H_1, H_2, \dots, H_n$  образующих полную группу, поэтому событие  $A$  может появиться только в комбинации с какой-либо из этих гипотез, т. е.

$$A = H_1A + H_2A + \dots + H_nA.$$

Так как гипотезы  $H_1, H_2, \dots, H_n$  несовместны, то и комбинации  $H_1A + H_2A + \dots + H_nA$  также несовместны. Применяя теорему сложения, получим для этих гипотез:

$$P(A) = P(H_1A) + P(H_2A) + \dots + P(H_nA) = \sum_{i=1}^n P(H_iA).$$

Применяя к событию  $H_iA$  теорему умножения, получим

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

что и требовалось доказать.

**Пример 4.11.** По движущемуся танку производят три выстрела из артиллерийского орудия. Вероятность попадания при первом выстреле равна 0,5; при втором - 0,7; при третьем - 0,8. Для вывода танка из строя заведомо достаточно трех попаданий. При одном попадании танк выходит из строя с вероятностью 0,3; при двух попаданиях - с вероятностью 0,9. Определить вероятность того, что в результате трех выстрелов танк выйдет из строя.

**Решение.** Рассмотрим четыре гипотезы:  $H_0$  - в танк не попало ни одного снаряда.  $H_1$  - в танк попал один снаряд,  $H_2$  - в танк попало два снаряда и  $H_3$  - в танк попало три снаряда.

Пользуясь теоремами сложения и умножения, найдем вероятности этих гипотез:

$$P(H_0) = 0,5*0,3*0,2 = 0,03;$$

$$P(H_1) = 0,5*0,3*0,2 + 0,5*0,7*0,2 + 0,5*0,3*0,8 = 0,22;$$

$$P(H_2) = 0,5*0,7*0,2 + 0,5*0,3*0,8 + 0,5*0,7*0,8 = 0,47;$$

$$P(H_3) = 0,5*0,7*0,8 = 0,28.$$

Условные вероятности события  $A$  (выход из строя танка) при этих гипотезах равны:

$$P(A/H_0) = 0; P(A/H_1) = 0,3; P(A/H_2) = 0,9; P(A/H_3) = 1,0.$$

Применяя формулу полной вероятности, получим

$$\begin{aligned} P(A) &= P(H_0) \cdot P(A/H_0) + P(H_1) \cdot P(A/H_1) + \\ &+ P(H_2) \cdot P(A/H_2) + P(H_3) \cdot P(A/H_3) = \\ &= 0,03 \cdot 0 + 0,22 \cdot 0,3 + 0,47 \cdot 0,9 + 0,28 \cdot 1,0 = 0,769. \end{aligned}$$

В практике применения теории вероятностей часто приходится встречаться с задачами, в которых один и тот же опыт или аналогичные опыты повторяются многократно. В результате каждого опыта может появиться или не появиться некоторое событие  $A$ , причем нас интересует не результат каждого отдельного опыта, а общее число появлений события  $A$  в результате серии опытов. Например, если производится группа выстрелов по одной и той же цели, то нас интересует не результат каждого выстрела, а общее число попаданий.

Если проводят  $n$  независимых опытов, в каждом из которых событие  $A$  появляется с вероятностью  $p$ , то вероятность того, что событие появится ровно  $m$  раз, выражается формулой Бернулли

$$P_m = C_n^m p^m q^{n-m}, \quad (4.29)$$

где  $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$ ;  $q = 1 - p$ .

**Пример 4.12.** При проведении стрельб из орудия по щиту было зафиксировано десять промахов ( $m = 10$ ) из пятисот выстрелов ( $n = 500$ ).

Определить вероятность того, что при ста выстрелах будет ровно четыре промаха, если считать, что все выстрелы независимы и вероятность промаха в каждом выстреле одинакова.

**Решение.** Найдем вероятность промаха при одном выстреле по формуле

$$P = m/n = 10/500 = 0,02.$$

Далее по формуле (4.29) найдем вероятность появления четырех промахов из ста выстрелов

$$P_4 = C_{100}^4 0,2^4 \cdot 0,8^{100-4} \approx 0,000003.$$

Ответ:  $P_4 \approx 0,000003$ .

## 5. Причины потери работоспособности технического объекта

### 5.1. Источники и причины изменения начальных параметров технической системы

Те изменения, которые происходят с течением времени в любой технической системе и приводят к потере ее работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями, которым она подвергается. В процессе эксплуатации на систему действуют все виды энергии, что может привести к изменению параметров отдельных элементов, механизмов и системы в целом. При этом имеется три основных источника воздействий:

- действие энергии окружающей среды, включая человека, исполняющего функции оператора или ремонтника;

- внутренние источники энергии, связанные как с рабочими процессами, протекающими в технической системе, так и с работой отдельных элементов системы;

- потенциальная энергия, которая накоплена в материалах и деталях узлов системы в процессе их изготовления (внутренние напряжения в отливке, монтажные напряжения).

При работе технического объекта наблюдаются следующие основные виды энергии, влияющие на его работоспособность.

*Механическая энергия*, которая не только передается по всем элементам системы в процессе работы, но и воздействует на нее в виде статических или динамических нагрузок от взаимодействия с внешней средой.

Силы, возникающие в узлах технической системы, определяются характером рабочего процесса, инерцией перемещающихся частей, трением в кинематических парах. Эти силы являются случайными функциями времени. Природа их возникновения, как правило, связана со сложными физическими явлениями.

Механическая энергия в системе может возникнуть и как следствие тех затрат энергии, которые имели место при изготовлении отдельных частей системы и сохранились в них в потенциальной форме. Например, деформация частей при перераспределении внутренних напряжений, изменение объема детали после ее термической обработки происходят без всяких внешних воздействий.

*Тепловая энергия* действует на систему и ее части при колебаниях температуры окружающей среды, при осуществлении рабочего процесса (особенно сильные тепловые воздействия имеют место при работе двигателей и ряда технологических машин), при работе приводных механизмов, электротехнических и гидравлических устройств.

*Химическая энергия* также оказывает влияние на работу системы. Даже воздух, который содержит влагу и агрессивные составляющие, может вызвать коррозию отдельных узлов системы.

Если же оборудование системы работает в условиях агрессивных сред (оборудование химической промышленности, суда, многие машины текстильной промышленности и др.), то химические воздействия вызывают процессы, приводящие к разрушению отдельных элементов и узлов системы.

*Ядерная (атомная) энергия*, выделяющаяся в процессе превращения атомных ядер, может воздействовать на материалы (особенно в космосе), изменяя их свойства.

*Электромагнитная энергия* в виде радиоволн (электромагнитных колебаний) пронизывает все пространство вокруг объекта и может оказать влияние на работу электронной аппаратуры.

*Биологические факторы* также могут влиять на работоспособность системы. Например, в тропических странах имеются микроорганизмы, которые не только разрушают некоторые виды пластмасс, но даже могут воздействовать на металл.

Таким образом, все виды энергии действуют на техническую систему и ее механизмы, вызывают в ней целый ряд нежелательных процессов, создают условия для ухудшения ее технических характеристик.

## **5.2. Процессы, снижающие работоспособность системы**

Различные виды энергии, действуя на систему, вызывают в ее узлах и деталях процессы, снижающие начальные параметры изделия. Эти процессы связаны, как правило, со сложными физико-химическими явлениями и приводят к деформации, износу, поломке, коррозии и другим видам повреждений. Это, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных параметров изделия, что может привести к отказу.

Приведем примеры данных взаимосвязей. Механическая энергия, действующая в звеньях металлорежущего станка, приводит к возникновению процесса износа его звеньев. Это вызывает искажение начальной формы сопряжения (т. е. их повреждение), что приводит к потере станком точности, которая является основным выходным параметром станка. При достижении определенной погрешности обработки возникает отказ.

Химическая энергия вызывает процессы коррозии в резервуарах и трубопроводах агрегатов химической промышленности. Повреждение стенок резервуаров может привести вначале к ухудшению выходных параметров агрегата (загрязнение химических веществ, изме-

нение пропускных сечений трубопроводов), а затем при разрушении стенок к полному выходу из строя изделия.

Сочетание механических воздействий в том числе высокочастотных колебаний, а также влияние температурных и химических факторов на элементы конструкции самолетов приводит к тому, что в них могут возникнуть усталостные разрушения (трещины). Они снижают несущую способность системы, что при определенной величине повреждения приводит к разрушению элемента конструкции и может закончиться аврией.

Процесс, возникающий в результате действия того или иного вида энергии, может не сразу привести к повреждению изделия. Часто существует период «накопления воздействий» прежде чем начнется период внешнего проявления процесса, т. е. повреждение изделия. Например, для начала развития усталостной трещины необходимо определенное число циклов переменных напряжений.

*Повреждение материала изделия — это отклонение его контролируемых свойств от начальных, оно связано с выходными параметрами изделия определенной зависимостью. Не всякое повреждение влияет на выходные параметры изделия. Также и определенная степень этого повреждения может не повлиять на показатели работоспособности.*

В надежности машин часто пользуются понятием *дефекта*, т. е. такого состояния изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации, однако остается работоспособным. При этом дефект рассматривается как возможная причина отказа. Понятие дефекта следует относить только к результату технологического процесса, а понятие повреждения - к результату воздействий на систему при ее эксплуатации. При этом необходимо рассматривать не только факт возникновения повреждений, но и оценить степень этого повреждения. При достижении некоторого максимального значения степени повреждения наступает отказ изделия.

### 5.3. Физика отказов

#### 5.3.1. Анализ закономерностей изменения свойств материалов

Изменение начальных свойств и состояния материалов, из которых выполнено изделие, является первопричиной потери им работоспособности, так как эти изменения могут привести к повреждению изделия и к опасности возникновения отказа.

Чем глубже изучены закономерности, описывающие процессы изменения свойств и состояния материалов, тем достовернее можно предсказать поведение изделия в данных условиях эксплуатации и обеспечить сохранение показателей надежности в требуемых пределах.

Хотя для оценки надежности, как правило, используются вероятностные характеристики, это не значит, что суждение о поведении изделия можно сделать лишь на основании статистических исследований.

Наоборот, в основе потери машиной работоспособности всегда лежат физические закономерности, но в силу разнообразия и переменности действующих факторов эти зависимости приобретают вероятностный характер.

Пусть скорость некоторого процесса повреждения материала  $\gamma$  есть функция ряда входных параметров  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  и времени  $t$ , причем данная зависимость получена на основе физико-химических законов:

$$\gamma = dU/dt = \varphi (Z_1, Z_2, \dots, Z_n, t) \quad (5.1)$$

Параметры  $Z_i$  характеризуют условия эксплуатации (нагрузки, скорости, температура и др.), состояние материала (твердость, прочность, качество поверхности и т. д.) и другие факторы, влияющие на протекание процесса повреждения материала. Однако при наличии только функциональной зависимости, достаточно достоверно описывающей данное явление,

нельзя еще точно предсказать, как будет протекать данный процесс, так как сами аргументы  $Z_1, \dots, Z_n$  являются случайными величинами.

Действительно, при работе машины происходят непредвиденные изменения и колебания нагрузок, скоростей, температур, степени загрязнения поверхностей. Более того, сами детали машины могут быть выполнены с различными допусками на технологические параметры (точность, однородность материала и др.).

Однако знание физической закономерности процесса в корне изменяет возможности по оценке хода процесса по сравнению со случаем, когда этот процесс оценивается только на основе статистических наблюдений.

Функциональная зависимость, хотя и абстрагирует действительность и лишь с известной степенью приближения отражает физическую сущность процесса, но позволяет предсказывать возможный ход процесса при различных ситуациях.

Поэтому «физика отказов», которая изучает закономерности изменения свойств материалов в условиях их эксплуатации, является основой для изучения и оценки надежности машин.

Для решения инженерных задач надежности необходимо знать закономерности изменения выходных параметров системы и ее элементов во времени. Современная наука изучает закономерности изменения свойств и состояния материалов на следующих уровнях.

*Субмикроскопический уровень*, когда на основании рассмотрения строения атомов и молекул и образования из них кристаллических решеток твердых тел или иных структур выявляются закономерности, которые служат базой для объяснения свойств и поведения материалов в различных условиях.

*Микроскопический уровень* рассмотрения свойств материалов исходит из анализа процессов, происходящих в небольшой области. Полученные при этом закономерности в дальнейшем распространяются на весь объем тела.

Изучение влияния совместного действия силовых и физико-химических факторов на поведение твердых тел в процессе их эксплуатации привело к появлению нового направления - физико-химической механики материалов.

*Макроскопический уровень* рассматривает изменение начальных свойств или состояния материала всего тела (детали). Так теория упругости на основе закона Гука рассматривает деформации и напряжения в системах и деталях различной конфигурации, работающих на растяжение, кручение, изгиб и другие виды деформации.

Разнообразные закономерности и методы расчетов, применяемые при конструировании и производстве машин, полученные общие физические законы и частные зависимости могут быть использованы и при решении вопросов надежности. При этом, поскольку главной задачей является оценка изменения свойств и состояния материала в функции времени, необходимо выявить, какие физические закономерности могут быть использованы и как проявляется фактор времени при оценке работоспособности изделия.

### 5.3.2. Законы состояния

Как физические законы, так и полученные на их основе частные зависимости, описывающие изменение свойств и состояния материалов, можно разделить на две основные группы.

Во-первых, это закономерности, описывающие взаимосвязи обратимых процессов, когда после прекращения действия внешних факторов материал (и соответственно деталь) возвращается в исходное состояние. Эти зависимости называются *законами состояния*.

Во-вторых, имеются закономерности, которые описывают необратимые процессы и, следовательно, позволяют оценить те изменения начальных свойств материалов, которые

происходят или могут происходить в процессе эксплуатации изделия. Эти зависимости называются *законами старения*.

*Законы состояния* можно разделить на *статические*, когда в функциональную зависимость, описывающую связь между входными и выходными параметрами, фактор времени не входит, и на *переходные* процессы, где учитывается изменение выходных параметров во времени.

Типичными примерами статических законов состояния могут служить закон Гука, закон теплового расширения твердых тел и др. На основании этих законов получены расчетные зависимости для решения различных инженерных задач.

Статические законы, описывающие изменения состояния изделия, хотя и не включают фактор времени, но могут быть использованы для расчетов надежности, если известны изменения характеристик изделия в процессе эксплуатации.

Законы состояния, описывающие *переходные процессы*, например колебания упругих систем, процессы теплопередачи и другие, хотя и включают фактор времени, но также не учитывают изменений, происходящих при эксплуатации изделий. Обычно они относятся к категории быстропротекающих процессов или процессов средней скорости. Лишь при известном изменении уровня внешних воздействий их можно использовать для решения задач надежности.

### 5.3.3. Законы старения

Основное значение для оценки потери изделием работоспособности имеет изучение законов старения, которые раскрывают физическую сущность необратимых изменений, происходящих в материалах изделия. Хотя законы старения всегда связаны с фактором времени, в некоторых из них время непосредственно не фигурирует, так как в полученных зависимостях отыскивается связь с другими факторами (например, энергией), которые, в свою очередь, проявляются во времени. Такие зависимости будем называть *законами превращения*.

Типичным примером законов превращения могут служить зависимости, описывающие процессы коррозии. Вывести закономерности, непосредственно отражающие изменение величины коррозии во времени, трудно: во-первых, в результате поливариантности коррозионных процессов, когда большое число факторов оказывает одновременно и часто противоположное действие на интенсивность повреждения, и во-вторых, коррозия может быть не только равномерно распределенной по поверхности металла (например, в виде окисной пленки), но и носить локальный характер (местная коррозия) или проявляться в виде межкристаллитной коррозии.

Для оценки возможности возникновения и интенсивности коррозионного процесса применяют законы химической термодинамики.

Применение физико-химических закономерностей для оценки интенсивности протекания процессов химической коррозии является типичным подходом к анализу сложных явлений старения и разрушения материалов.

Хотя для прогноза поведения изделия при эксплуатации и для выбора оптимальных решений желательнее было бы иметь непосредственные зависимости протекания данного процесса старения во времени, сложность явления не позволяет на данном этапе получить эту закономерность.

Поэтому используются, физические и химические законы, отражающие наиболее существенные стороны процесса и показатели, по которым можно косвенно судить об интенсивности процесса.

*Законы старения*, оценивающие степень повреждения материала в функции времени, являются основой для решения задач надежности. Они позволяют прогнозировать ход процесса старения, оценивать возможные его реализации и выявлять наиболее существенные

факторы, влияющие на интенсивность процесса. Типичным примером таких зависимостей являются законы износа материалов, которые на основе раскрытия физической картины взаимодействия поверхностей дают методы для расчета интенсивности процесса изнашивания или величины износа в функции времени и оценивают параметры, влияющие на ход процесса.

Многие временные закономерности физико-химических процессов могут быть получены на основе рассмотрения кинетики термоактивационных процессов. Изменение свойств твердых тел происходит в результате перемещений и перегруппировок элементарных частиц (атомов, молекул, электронов, протонов и др.), изменения их положения в кристаллической решетке.

Это относится к той небольшой части элементарных частиц, энергия которых превосходит некоторый уровень, который называется энергией активации  $E_a$ . Скорость данного процесса тем больше, чем большее число частиц обладает энергией выше, чем энергия активации.

Любой процесс старения возникает и развивается лишь при определенных внешних условиях. Для оценки возможных видов повреждения материалов деталей машин необходимо установить область существования процесса старения и в первую очередь условия его возникновения. Для возникновения процесса обычно должен быть превзойден определенный уровень нагрузок, скоростей, температур или других параметров, определяющих его протекание. Этот начальный уровень или порог чувствительности особенно важно знать для быстротекающих процессов старения, когда после возникновения процесса идет его интенсивное лавинообразное развитие. Часто порог чувствительности связывают с некоторым энергетическим уровнем, который определяет начало данного процесса. Например, энергия активации  $E_a$  определяет энергетический уровень, начиная с которого может идти процесс изменения свойств материала.

Энергетическая концепция лежит в основе теории возникновения трещин в металлических конструкциях при средних напряжениях, остающихся ниже предела текучести.

#### **5.4. Отказы, вызываемые общими причинами (множественные отказы)**

Множественный отказ есть событие, при котором несколько элементов выходят из строя по одной и той же причине. К числу таких причин могут быть отнесены следующие:

- *конструкторские недоработки оборудования* (дефекты, не выявленные на стадии проектирования и приводящие к отказам вследствие взаимной зависимости между электрическими и механическими подсистемами или элементами избыточной системы);
- *ошибки эксплуатации и технического обслуживания* (неправильная регулировка или калибровка, небрежность оператора, неправильное обращение и т. я.);
- *воздействие окружающей среды* (пыль, грязь, температура, вибрация, а также экстремальные режимы нормальной эксплуатации);
- *внешнее катастрофическое воздействие* (естественные внешние явления, такие, как наводнение, землетрясение, пожар, ураган);
- *общий изготовитель* (резервируемое оборудование или его компоненты, поставляемые одним и тем же изготовителем, могут иметь общие конструктивные или производственные дефекты. Например, производственные дефекты могут быть вызваны неправильным выбором материала, ошибками в схемах монтажа, некачественной пайкой и т. п.);
- *общий внешний источник питания* (общий источник питания для основного и резервного оборудования, резервируемых подсистем или элементов);
- *неправильное функционирование* (неверно выбранный комплекс измерительных приборов или неудовлетворительно спланированные меры защиты).

Известен целый ряд примеров множественных отказов атомных электростанций. Так, некоторые параллельно соединенные пружинные реле выходили из строя одновременно и их отказы были вызваны общей причиной; вследствие неправильного расцепления муфт при техническом обслуживании два клапана оказались установленными в неправильное положение; из-за разрушения паропровода имели место сразу несколько отказов коммуникационного щита. В некоторых случаях общая причина вызывает не полный отказ резервированной системы (одновременный отказ нескольких узлов, т. е. предельный случай), а менее серьезное общее понижение надежности, что приводит к повышению вероятности совместного отказа узлов системы.

## 6. Основные характеристики надежности элементов и систем

### 6.1. Показатели надежности невосстанавливаемого элемента

*Невосстанавливаемым* называют такой элемент, который после работы до первого отказа заменяют на такой же элемент, так как его восстановление в условиях эксплуатации невозможно. В качестве примеров невосстанавливаемых элементов можно назвать диоды, конденсаторы, триоды, микросхемы, гидроклапаны, пиропатроны и т.п.

Пусть время работы невосстанавливаемого элемента представляет собой случайную величину  $\tau$ . В момент времени  $t = 0$  элемент начинает работать, а в момент  $t = \tau$  происходит его отказ, следовательно,  $\tau$  является временем жизни элемента. Таким образом,  $\tau$  имеет случайный характер, и в качестве основного показателя надежности элемента можно назвать функцию распределения, которая выражается зависимостью вида

$$F(t) = P(\tau < t). \quad (6.1)$$

Функцию  $F(t)$  называют также вероятностью отказа элемента до момента  $t$ . Если элемент работает в течение времени  $t$  непрерывно, то существует *непрерывная плотность вероятности отказа*

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (6.2)$$

Следующим показателем надежности является вероятность безотказной работы за заданное время  $t$  или *функция надежности*, которая является функцией, обратной функции распределения

$$P(t) = 1 - F(t) = P(\tau > t). \quad (6.3)$$

Графически функция надежности представляет собой монотонно убывающую кривую (рис. 6.1; при  $t=0$   $P(t=0)=1$ ; при  $t \rightarrow \infty$   $P(t=\infty)=0$ ).

В общем виде вероятность безотказной работы испытываемых элементов конструкций определяется как отношение числа элементов оставшихся исправными в конце времени испытания к начальному числу элементов поставленных на испытание:

$$P(t) = (N - n)/N, \quad (6.4)$$

где  $N$  - начальное число испытываемых элементов;  $n$  - число отказавших элементов за  $t$ ;  $N - n = n_0$  - число элементов, сохранивших работоспособность.

Величина  $P(t)$  и вероятность появления отказа  $F$  в момент времени  $t$  связаны соотношением

$$P(t) + F(t) = 1, \quad (6.5)$$

откуда

$$F(t) = 1 - P(t) \quad (6.6)$$

или

$$F(t) = 1 - n_0/N. \quad (6.7)$$



Производная функции (6.4) по времени имеет вид

$$dP(t)/dt = - (1/N) dn/dt. \quad (6.8)$$

При  $dt \rightarrow 0$ , это выражение является мгновенным значением плотности распределения времени безотказной работы  $f(t)$ , т.е.

$$(1/N) dn/dt \rightarrow f(t) \text{ или } dP(t)/dt = - f(t) \quad (6.9)$$

Учитывая, что  $P(t) = n_0/N$  выражение (6.8) можно записать в виде

$$dn(t)/dt = - N dP/dt = dn_0(t)/dt. \quad (6.10)$$

Разделив обе части соотношения (6.10) на  $n_0(t)$  получим:

$$[1/n_0(t)] dn(t)/dt = - [N/n_0(t)] dP(t)/dt = \lambda(t), \quad (6.11)$$

где  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов.

Подставляя формулу (6.9) в соотношение (6.11) получаем выражение для мгновенного значения интенсивности отказов

$$\lambda(t) = - [1/P(t)] dP(t)/dt = f(t)/P(t). \quad (6.12)$$

Вероятность безотказной работы из выражения (6.12) можно представить в виде

$$- dP(t)/P(t) = \lambda(t)dt. \quad (6.13)$$

Интегрируя обе части уравнения (6.13) по времени в интервале  $[0, t]$ , получаем

$$\int_0^t \lambda(t) dt = - \int_1^{P(t)} [1/P(t)] dP(t). \quad (6.14)$$

При известных начальных условиях, т.е. при  $t = 0$ , когда  $P(t) = 1$ , это интегральное уравнение принимает вид

$$- \int_0^t \lambda(t) dt = \ln P(t) \quad (6.15)$$

Из формулы (6.15) получаем общее выражение для вероятности безотказной работы

$$P(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(t) dt]. \quad (6.16)$$

С помощью данного выражения можно получить формулу для вероятности безотказной работы любого элемента технической системы при любом известном распределении времени наработки на отказ.

Важнейшим показателем невосстанавливаемого элемента является *среднее время безотказной работы* ( $T_0$ ), которое определяют как математическое ожидание случайной величины

$$T_0 = M[\tau] = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (6.17)$$

После преобразования:

$$T_0 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t P(t) dt + \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (6.18)$$

*Среднее время безотказной работы* и *среднюю наработку до отказа* можно получить по результатам испытаний. Для этого нужно проводить испытания до тех пор, пока не откажет последний из элементов. Пусть *время жизни* каждого из элементов соответственно равно  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ . Тогда средняя наработка до отказа

$$T_0 = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i. \quad (6.19)$$

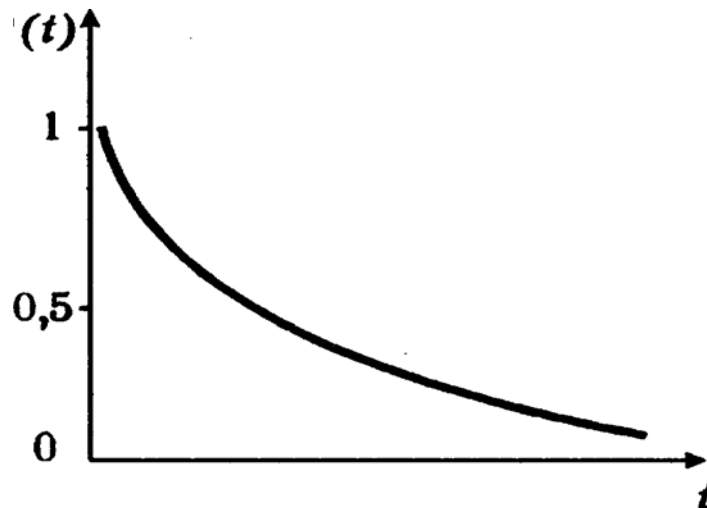


Рис. 6.1. Кривая функции надежности

Так как практически невозможно осуществить испытания всех элементов до отказа, то при большом значении  $n$  среднюю наработку до отказа можно определить по формуле

$$T_0 \approx \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n + (N - n)t}{N}, \quad (6.20)$$

где  $n$  — число отказавших элементов,  $N$  — число элементов, поставленных на испытания.

**Пример 6.1.** На испытания поставлено  $N = 100$  элементов. Испытания проводились в течение  $t = 200$  ч. В процессе проведения испытаний отказало  $n = 5$  элементов, при этом отказы зафиксированы в следующие моменты:  $\tau_1 = 50$  ч;  $\tau_2 = 80$  ч;  $\tau_3 = 90$  ч;  $\tau_4 = 100$  ч;  $\tau_5 = 150$  ч; остальные элементы не отказали. Определить среднюю наработку до отказа  $T_0$ .

Решение. Для решения задачи воспользуемся формулой (6.20)

$$T_0 = [(50+80+90+100+150)+(100-5)200]/100 = 194.7 \text{ ч.}$$

Ответ:  $T_0 = 194.7$  ч.

Если испытаниям подвергают  $N$  элементов и  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$  — время их жизни, то *статистическую дисперсию* находят из выражения

$$S^2 = 1/(N-1) \sum_{i=1}^N (\tau_i - \tau)^2 \quad (6.21)$$

где  $\tau = (1/N)\sum \tau_i$ .

На практике в качестве оценки надежности чаще используют *среднее квадратическое отклонение* ( $\sigma$ ), которое определяют как корень квадратный из дисперсии:

$$\sigma[\tau] = (D[\tau])^{1/2}. \quad (6.22)$$

Одной из важнейших характеристик надежности невосстанавливаемого элемента является *интенсивность отказов*, или *опасность отказа*, которая определяет надежность элемента в каждый данный момент времени. Интенсивность отказа находят по формуле

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) = - [dP(t)/dt]/P(t) = - P'(t)/P(t). \quad (6.23)$$

Вероятность безотказной работы в интервале  $(t_1, t_2)$  выражается зависимостью

$$P(t) = \exp \left\{ - \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right\} \quad (6.24)$$

Функция  $\lambda(t)$  может быть определена по результатам испытаний. Предположим, что испытаниям подвергают  $N$  элементов. Пусть  $n(t)$  — число элементов, не отказавших к моменту  $t$ . Тогда при достаточно малом  $\Delta t$  и достаточно большом  $N$  получим

$$\lambda(t) = \Delta n / [\Delta t n(t)], \quad (6.25)$$

где  $\Delta n$  — число отказов на участке  $\Delta t$ .

*Статистическая интенсивность отказов*  $\lambda(t)$  равна отношению числа отказов, происшедших в единицу времени, к общему числу неотказавших элементов к этому моменту времени.

Многочисленные опытные данные показывают, что для многих элементов функция  $\lambda(t)$  имеет корытообразный вид (рис. 6.2).

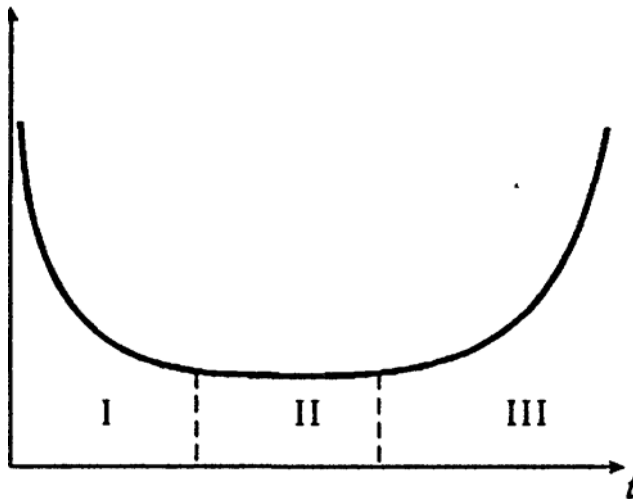


Рис. 6.2. Кривая интенсивности отказов во времени

Анализ графика показывает, что время испытания можно условно разбить на три периода. В первом из них функция  $\lambda(t)$  имеет повышенные значения. Это период приработки или период ранних отказов для скрытых дефектов. Второй период называют периодом нормальной работы. Для этого периода характерна постоянная интенсивность отказов. Последний, третий период — это период старения. Так как период нормальной работы является основным, то в расчетах надежности принимается  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ . В этом случае при экспоненциальном законе распределения функция надежности имеет вид:

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (6.26)$$

Среднее время жизни соответственно равно:

$$T_0 = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = 1/\lambda. \quad (6.27)$$

Поэтому функцию надежности можно записать и так:

$$P(t) = \exp(-t/T_0). \quad (6.28)$$

Если время работы элемента мало по сравнению со средним временем жизни, то можно использовать приближенную формулу

$$P(t) \approx 1 - t/T_0. \quad (6.29)$$

**Пример 6.2.** По данным эксплуатации генератора установлено, что наработка до отказа подчиняется экспоненциальному закону с параметром  $\lambda = 2 \cdot 10^{-5}$  1/час.

Найти вероятность безотказной работы за время  $t = 100$  часов. Определить математическое ожидание наработки до отказа.

Решение.

Определим вероятность безотказной работы по формуле (6.26):

$$P(t) = e^{-\lambda t} = \exp(-2 \cdot 10^{-5} \cdot 100) = 0,998.$$

Математическое ожидание наработки до отказа определяем по формуле (5.27):

$$M_0 = 1/\lambda = 1/(2 \cdot 10^{-5}) = 5 \cdot 10^4 \text{ ч.}$$

Ответ:  $P(t) = 0,998$ ;  $M_0 = 5 \cdot 10^4$  ч.

**Пример 6.3.** Построить кривую интенсивности отказов по данным табл. 6.1. На испытание поставлено  $N$  элементов ( $N = 200$ ), испытания проводились в течение  $t = 100$  ч.

Результаты испытаний элемента (к примеру 6.3.)

№ п/п	$\Delta t$ , ч	$\Delta n$	$n(t)$	№ п/п	$\Delta t$ , ч	$\Delta n$	$n(t)$
1	0-10	10	190	6	50-60	2	168
2	10-20	8	182	7	60-70	2	166
3	20-30	6	176	8	70-80	4	162
4	30-40	4	172	9	80-90	5	157
5	40-50	2	170	10	90-100	8	149

Обозначения:  $\Delta t$  — интервал испытаний;  $\Delta n$  — число отказов;  $n(t)$  — число неотказавших элементов.

Для построения кривой (рис.6.3.) вычислим интенсивность отказов  $\lambda(t_i)$  ч<sup>-1</sup> по формуле (6.25):

$$\lambda(t_1) = 10/(10 \cdot 190) = 0,0052;$$

$$\lambda(t_2) = 8/(10 \cdot 182) = 0,0044;$$

$$\lambda(t_3) = 6/(10 \cdot 176) = 0,0034;$$

$$\lambda(t_4) = 4/(10 \cdot 172) = 0,0023;$$

$$\lambda(t_5) = 2/(10 \cdot 170) = 0,0011;$$

$$\lambda(t_6) = 2/(10 \cdot 168) = 0,0011;$$

$$\lambda(t_7) = 2/(10 \cdot 166) = 0,0012;$$

$$\lambda(t_8) = 4/(10 \cdot 162) = 0,0024;$$

$$\lambda(t_9) = 5/(10 \cdot 157) = 0,0032;$$

$$\lambda(t_{10}) = 8/(10 \cdot 149) = 0,0053.$$

$$\lambda(t)10^{-3}, \text{ ч}^{-1}$$

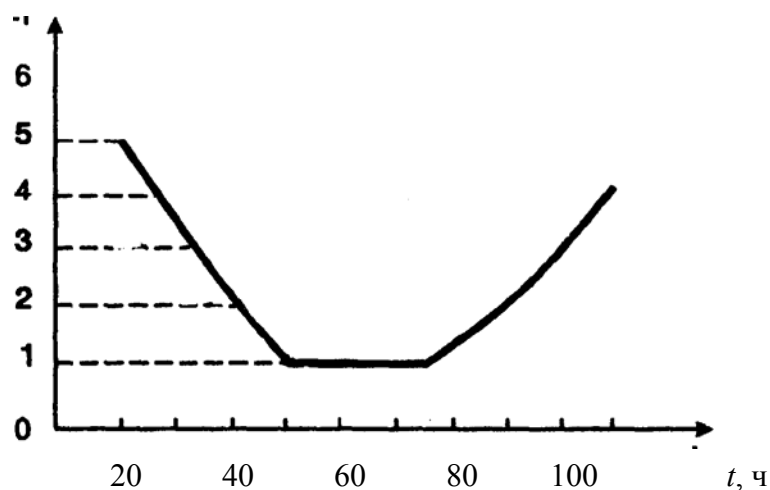


Рис. 6.3. Кривая интенсивности отказов во времени

## 6.2. Показатели надежности восстанавливаемого элемента

Большинство сложных технических систем с длительными сроками службы являются *восстанавливаемыми*, т.е. возникающие в процессе эксплуатации отказы систем устраняют при ремонте. Технически исправное состояние изделий в процессе эксплуатации поддерживают проведением профилактических и восстановительных работ.

Для осуществляемых в процессе эксплуатации изделий работ по поддержанию и восстановлению их работоспособности характерны значительные затраты труда, материальных

средств и времени. Как правило, эти затраты за время эксплуатации изделия значительно превышают соответствующие затраты на его изготовление. Совокупность работ по поддержанию и восстановлению работоспособности и ресурса изделий подразделяют на *техническое обслуживание, и ремонт*, которые, в свою очередь, подразделяют на *профилактические работы*, осуществляемые в плановом порядке и *аварийные*, проводимые по мере возникновения отказов или аварийных ситуаций.

Свойство ремонтпригодности изделий влияет на материальные затраты и длительность простоев в процессе эксплуатации. Ремонтпригодность тесно связана с безотказностью и долговечностью изделий. Так, для изделий, с высоким уровнем безотказности, как правило, характерны низкие затраты труда и средств на поддержание их работоспособности. Показатели безотказности и ремонтпригодности изделий являются составными частями комплексных показателей, таких как коэффициенты готовности  $K_r$  и технического обслуживания  $K_{т.и.}$ .

К показателям надежности, присущим только восстанавливаемым элементам, следует отнести среднюю наработку на отказ, наработку между отказами, вероятность восстановления, среднее время восстановления, коэффициент готовности и коэффициент технического использования.

*Средняя наработка на отказ* — наработка восстанавливаемого элемента, приходящаяся, в среднем, на один отказ в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определенной продолжительности эксплуатации:

$$T_o = 1/m \sum_{i=1}^m t_i \quad (6.30)$$

где  $t_i$  — наработка элемента до  $i$ -го отказа;  $m$  — число отказов в рассматриваемом интервале суммарной наработки.

*Нарработка между отказами* определяется объемом работы элемента от  $i$ -го отказа до  $(i + 1)$ -го, где  $i = 1, 2, \dots, m$ .

*Среднее время восстановления* одного отказа в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определенной продолжительности эксплуатации

$$T_b = 1/m \sum_{i=1}^m t_{bi} \quad (6.31)$$

где  $t_{bi}$  — время восстановления  $i$ -го отказа;  $m$  — число отказов в рассматриваемом интервале суммарной наработки.

*Коэффициент готовности*  $K_r$  представляет собой вероятность того, что изделие будет работоспособно в произвольный момент времени, кроме периодов выполнения планового технического обслуживания, когда применение изделия по назначению исключено. Этот показатель является комплексным, так как он количественно характеризует одновременно два показателя: безотказность и ремонтпригодность.

В стационарном (установившемся) режиме эксплуатации и при любом виде закона распределения времени работы между отказами и времени восстановления коэффициент готовности определяют по формуле

$$K_r = T_o / (T_o + T_b) \quad (6.32)$$

где  $T_o$  — средняя наработка на отказ;  $T_b$  — среднее время восстановления одного отказа.

Таким образом, анализ формулы показывает, что надежность изделия является функцией не только безотказности, но и ремонтпригодности. Это означает, что низкая надежность может быть несколько компенсирована улучшением ремонтпригодности. Чем выше интенсивность восстановления, тем выше готовность изделия. Если время простоя велико, то готовность будет низкой.

Другой важной характеристикой ремонтпригодности является коэффициент технического использования, который представляет собой отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме этой наработки и времени всех простоев, обусловленных устранением отказов, техническим обслуживанием и ремонтами за этот период. Коэффициент технического использования представляет собой вероятность того, что изделие будет работать в надлежащем режиме за время  $T$ . Таким образом,  $K_{\text{и}}$  определяется двумя основными факторами — надежностью и ремонтпригодностью.

*Коэффициент технического использования* характеризует долю времени нахождения элемента в работоспособном состоянии относительно рассматриваемой продолжительности эксплуатации. Период эксплуатации, для которого определяется коэффициент технического использования, должен содержать все виды технического обслуживания и ремонтов. Коэффициент технического использования учитывает затраты времени на плановые и неплановые ремонты, а также регламенты, и определяется по формуле

$$K_{\text{ти}} = t_{\text{н}} / (t_{\text{н}} + t_{\text{в}} + t_{\text{р}} + t_{\text{о}}), \quad (6.33)$$

где  $t_{\text{н}}$  — суммарная наработка изделия в рассматриваемый промежуток времени;  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{р}}$  и  $t_{\text{о}}$  — соответственно суммарное время, затраченное на восстановление, ремонт и техническое обслуживание изделия за тот же период времени.

**Пример 6.4.** Определить коэффициент готовности системы, если известно, что среднее время восстановления одного отказа равно  $T_{\text{в}} = 5$  ч, а среднее значение наработки на отказ составляет  $T_{\text{о}} = 500$  ч.

Решение. Для определения коэффициента готовности воспользуемся формулой (6.32)

$$K_{\text{г}} = T_{\text{о}} / (T_{\text{о}} + T_{\text{в}}) = 500 / (500 + 5) = 0,99.$$

Ответ:  $K_{\text{г}} = 0,99$ .

**Пример 6.5.** Определить коэффициент технического использования машины, если известно, что машину эксплуатируют в течение года ( $T_{\text{э}} = 8760$  ч). За этот период эксплуатации машины суммарное время восстановления отказов составило  $t_{\text{в}} = 40$  ч. Время проведения регламента составляет  $t_{\text{о}} = 20$  ч. Суммарное время, затраченное на ремонтные работы за период эксплуатации составляет 15 суток, т.е.  $t_{\text{р}} = 15 \times 24 = 360$  ч.

Решение. Коэффициент технического использования вычислим по формуле (6.33), но сначала определим суммарное время наработки машины:

$$t_{\text{н}} = T_{\text{э}} - (t_{\text{в}} + t_{\text{р}} + t_{\text{о}}) = 8760 - (40 + 360 + 20) = 8340 \text{ ч.}$$

$$K_{\text{и}} = t_{\text{н}} / (t_{\text{н}} + t_{\text{в}} + t_{\text{р}} + t_{\text{о}}) = t_{\text{н}} / T_{\text{э}} = 8340 / 8760 = 0,952.$$

Ответ:  $K_{\text{и}} = 0,952$ .

**Пример 6.6.** При эксплуатации сложной технической системы получены статистические данные, которые сведены в табл. 6.2. Определить коэффициент готовности системы.

Таблица 6.2

Статистические данные, полученные при эксплуатации сложной технической системы (к примеру 6.6)

Номер системы	Число отказов $m_i$	Время, ч		
		восстановление отказа $t_{\text{в},i}$	работы $t_{\text{р}}$	Суммарное восстановление $m_i t_{\text{в},i}$
1	2	1	200	2
2	5	2	300	10
3	6	4	400	24
4	4	3	300	12
5	8	2	600	16

6	10	5	700	50
7	15	2	900	30
8	20	3	1000	60
Итого	70	-	4400	204

Наработка на отказ

$$T_o = \sum_{i=1}^8 t_{p,i} / \sum_{i=1}^8 m_i = 4400/70 = 62,8 \text{ ч.}$$

Среднее время восстановления

$$T_B = \sum_{i=1}^8 m_i t_{B,i} / \sum_{i=1}^8 m_i = 204/70 = 2,9 \text{ ч.}$$

По формуле (6.32) по вычисленным значениям  $T_o$  и  $T_B$  находим коэффициент готовности системы:

$$K_T = 62,8 / (62,8 + 2,9) = 0,95$$

### 6.3. Показатели надежности системы, состоящей из независимых элементов

Всякая система характеризуется безотказностью и ремонтпригодностью. В качестве основной характеристики безотказности системы служит функция надежности, которая представляет собой вероятность безотказной работы в течение некоторого времени  $t$ .

Пусть система состоит из  $n$  элементов, функции надежности которых обозначим через  $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ . Так как элементы, входящие в состав системы, являются независимыми, то вероятность безотказной работы системы определяется как произведение вероятностей составляющих ее элементов

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t). \quad (6.34)$$

В частном случае, когда функции надежности составляющих элементов имеют экспоненциальное распределение с постоянными интенсивностями отказов, функция надежности системы определяется по формуле

$$P(t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t] = \exp[-\sum_{i=1}^n \lambda_i t] \quad (6.35)$$

Одной из важнейших характеристик безотказности системы является среднее время жизни, которое вычисляют, используя выражение

$$T_c = - \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (6.36)$$

Для случая экспоненциального распределения среднее время жизни системы равно

$$T_c = \int_0^{\infty} \exp[-\sum_{i=1}^n \lambda_i t] dt = 1/(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \quad (6.37)$$

Среднее время жизни системы или наработку на отказ по результатам статистических данных вычисляют по формуле

$$T_c = T/m, \quad (6.38)$$



где  $T$  — суммарная наработка системы, полученная по результатам испытаний или эксплуатации;  $m$  — суммарное число отказов, зафиксированное в процессе испытаний или эксплуатации.

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность системы, необходимость применения которой возникает в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение системы по назначению не предусматривается), начиная с которого система будет работать безотказно в течение заданного времени  $t$ . Значение коэффициента оперативной готовности определяют из выражения

$$K_o = K_r P(t) = P(t) T_c / (T_c + T_b). \quad (6.39)$$

**Пример 6.6.** Определить коэффициент оперативной готовности системы за период времени  $t = 10$  ч, если известно, что система состоит из пяти элементов с соответствующими интенсивностями отказов, ч<sup>-1</sup>:  $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ ;  $\lambda_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ ;  $\lambda_3 = 10^{-5}$ ;  $\lambda_4 = 20 \cdot 10^{-5}$ ;  $\lambda_5 = 50 \cdot 10^{-5}$ , а среднее время восстановления при отказе одного элемента равно  $T_b = 10$  ч. Результатами испытаний установлено, что распределение наработки на отказ подчиняется экспоненциальному закону.

Решение. Вероятность безотказной работы определим по формуле (6.35):

$$\begin{aligned} P(t) &= \exp[-\sum \lambda_i t] \approx 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) 10^{-5} t = \\ &= 1 - (2 + 5 + 1 + 20 + 50) 10^{-5} \cdot 10 = 0,992. \end{aligned}$$

Значение  $T_c$  определяем по формуле (6.37)

$$T_c = 1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) = 10^5 / 78 = 1282 \text{ ч.}$$

Используя формулу (6.39), вычислим коэффициент оперативной готовности

$$K_o = P(t) T_c / (T_c + T_b) = 0,992 \cdot 1282 / (1282 + 10) = 0,984.$$

Ответ:  $K_o = 0,984$ .

**Пример 6.7.** При эксплуатации в течении одного года ( $T_3 = 1 \text{ год} = 8760 \text{ ч.}$ ) изделий специального назначения было зафиксировано пять отказов ( $m = 5$ ). На восстановление каждого отказа в среднем затрачено двадцать часов ( $T_b = 20 \text{ ч.}$ ). За указанный период эксплуатации был проведен один регламент (техническое обслуживание). Время регламента составило десять суток ( $T_p = 240 \text{ ч.}$ ). Определить коэффициенты: готовности ( $K_r$ ) и технического использования ( $K_{и}$ ).

Решение. Коэффициент готовности определим по формуле

$$K_r = 1 - (m T_b / T_3) = 1 - (5 \cdot 20 / 8760) = 0,9886.$$

Коэффициент технического использования равен:

$$K_{и} = 1 - (m T_b + T_p) / T_3 = 1 - (5 \cdot 20 + 240) / 8760 = 0,9612.$$

Ответ:  $K_r = 0,9886$ ;  $K_{и} = 0,9612$ .

#### 6.4. Выбор и обоснование показателей надежности технических систем

Одной из важнейших задач на этапе проектирования является правильный выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности. Необоснованный выбор показателей надежности из широкой номенклатуры имеющихся показателей может привести к неправильным решениям при проектировании системы. Поэтому при выборе показателей надежности необходимо учитывать назначение системы, условия и режимы ее работы, а также ее ремонтпригодность.

Информация о назначении системы дает возможность определить область и интенсивность применения системы по назначению. Сведения об условиях и режимах работы системы используют для оценки влияния факторов окружающей среды на работоспособность проектируемой системы, а также влияния действующих внешних и внутренних нагрузок на несущую способность элементов системы. Количественные значения этих оценок являются исходными данными для расчета прочности и устойчивости элементов и узлов металлоконструкций.

Если по условиям применения систему предполагается ремонтировать в условиях эксплуатации, то в качестве одного из основных показателей надежности следует выбирать коэффициент готовности  $K_r$  или коэффициент технического использования  $K_{и}$ .

В случае, если отказ системы или отдельных ее элементов приводит к невыполнению важной задачи или нарушает безопасность работы обслуживающего персонала, а также вызывает угрозу для здоровья и жизни людей, находящихся в зоне действия системы, то для таких систем основным показателем надежности является безотказность, выражающаяся в виде наработки на отказ или вероятности безотказной работы.

Если в результате простоя системы после отказа возникают большие материальные затраты, то такая система должна иметь хорошую ремонтпригодность и высокие показатели безотказности.

Если система по условиям эксплуатации подлежит длительному хранению (ожиданию работы) или она должна транспортироваться на специальных транспортных средствах, то такая система должна обладать высокими показателями сохраняемости<sup>TM</sup> в соответствующих условиях хранения и транспортирования.

Все показатели надежности проектируемой системы должны обеспечивать нормальное ее функционирование в течение заданного срока эксплуатации.

## 6.5. Распределение нормируемых показателей надежности

Распределение норм надежности проводят на этапах эскизного и рабочего проектирования технической системы. Предполагается, что на любом из этих этапов конструирования систему можно разбить на некоторое число подсистем в виде отдельных сборочных единиц и исходить из начальной надежности каждой подсистемы, полученной расчетом или по результатам испытаний подсистем.

Пусть  $p_1, p_2, \dots, p_n$  означают надежность подсистем. Предположим, что отказ любой подсистемы приводит к отказу системы в целом, тогда надежность системы на основании теоремы умножения вероятностей имеет вид:

$$P = p_1 p_2 \dots p_n. \quad (6.40)$$

Пусть  $P^{TP}$  - требуемая надежность системы, причем значение надежности должно удовлетворять условию  $P^{TP} \geq P$ . Задача состоит в том, чтобы повысить хотя бы одно из значений  $p_i$  на столько, чтобы  $P \geq P^{TP}$ . Для повышения надежности необходимо произвести дополнительные затраты, связанные либо с введением резервирования в этой системе, либо с введением в систему более надежных элементов.

Методика повышения надежности  $P$  до требуемого значения  $P^{TP}$  сводится к следующему. Надежности  $p_1, p_2, \dots, p_n$  располагают в неубывающей последовательности:

$$p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_n. \quad (6.41)$$

Каждую из надежностей  $p_1, p_2, \dots, p_k$  увеличивают до одного и того же значения  $p_0^{TP}$ , а надежности, начиная с  $p_{k+1}, \dots, p_n$ , остаются неизменяемыми. Номер  $k$  выбирают из максимального значения  $j$ , для которого

$$p_j < [P^{TP}/\prod p_j]^{1/j} = r_j, \quad (6.42)$$

$j=1$

где  $p_{n+1}=1$  по определению.

Значение  $p_0^{\text{TP}}$  определяют из соотношения

$$p_0^{\text{TP}} = \left[ \frac{P^{\text{TP}}}{\prod_{j=k+1}^{n+1} p_j} \right]^{1/k} \quad (6.43)$$

Очевидно, что надежность системы после определения  $p_0^{\text{TP}}$  будет удовлетворять заданному требованию, поскольку новая надежность равна:

$$(p_0^{\text{TP}})^k p_{k+1} \dots p_n = (p_0^{\text{TP}})^k \prod_{j=k+1}^{n+1} p_j = P^{\text{TP}} \quad (6.44)$$

**Пример 6.8.** Пусть техническая система состоит из трех подсистем. Надежность каждой из них соответственно равна:  $p_1=0,7$ ;  $p_2=0,8$ ;  $p_3=0,9$ . Известно, что отказ любой одной подсистемы приводит к отказу системы в целом. Требуемое значение надежности системы равно  $P^{\text{TP}}=0,65$ .

Провести перераспределение норм надежности таким образом, чтобы произведение вероятностей трех подсистем соответствовало заданному требованию.

Решение. Используя формулу (6.40), получим:

$$P = p_1 p_2 p_3 = 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 0,504.$$

Предположим, что мы не рассчитываем  $k$  по формуле (6.42), а произвольно задаем  $k=1$ . Тогда, подставляя исходные данные в формулу (6.43), получим:

$$p_0^{\text{TP}} = [0,65/0,8 \cdot 0,9 \cdot 1,0]^{1/1} = 0,903.$$

$$P = 0,903 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 0,65.$$

Полученное значение надежности соответствует требуемому  $P^{\text{TP}}=0,65$ .

Однако на основании полученного значения  $p_0^{\text{TP}}$  можно заключить, что распределение средств, необходимых для повышения надежности, не было оптимальным. Другими словами, приложено больше средств для достижения заданного показателя, чем требовалось.

Определим теперь  $k$  по формуле (6.42). С этой целью вычислим три величины:

$$r_1 = [P^{\text{TP}}/p_2 p_3 \cdot 1,0]^{1/1} = [0,65/0,8 \cdot 0,9 \cdot 1,0]^{1/1} = 0,903;$$

$$r_2 = [P^{\text{TP}}/p_3 \cdot 1,0]^{1/2} = [0,65/0,9 \cdot 1,0]^{1/2} = 0,85;$$

$$r_3 = [P^{\text{TP}}/1,0]^{1/3} = [0,65/1,0]^{1/3} = 0,866.$$

Так как  $p_1 < r_1$ ,  $p_2 < r_2$ ,  $p_3 > r_3$ , примем  $k=2$ . В этом случае наибольшее значение индекса  $j$  со свойством  $p < r$ , равно двум. Далее, учитывая выражение (6.43), находим

$$p_0^{\text{TP}} = [0,65/0,9]^{1/2} = 0,85.$$

Это означает, что средства на повышение надежности необходимо распределить следующим образом: надежность подсистемы №1 увеличивают с 0,7 до 0,85; надежность подсистемы №2 - с 0,8 до 0,85; надежность подсистемы №3 оставляют на прежнем уровне. В результате вероятность безотказной работы всей системы:

$$P = (0,85)^2 \cdot 0,9 = 0,65.$$

## 7. Расчет показателей надежности технических систем

### 7.1. Структурные модели надежности сложных систем

Большинство технических систем являются сложными системами, состоящими из отдельных узлов, деталей, агрегатов, систем управления и т.п. Под *сложной системой* понимается объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы (компоненты), каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

С позиций надежности сложная система обладает как отрицательными, так и положительными свойствами.

Факторы, отрицательно влияющие на надежность сложных систем, следующие:

- во-первых, это большое число элементов, отказ каждого из которых может привести к отказу всей системы;

- во-вторых, оценить работоспособность сложных систем весьма затруднительно с точки зрения статистических данных, т.к. они часто являются уникальными или имеются в небольших количествах;

- в-третьих, даже у систем одинакового предназначения каждый экземпляр имеет свои незначительные вариации свойств отдельных элементов, что сказывается на выходных параметрах системы. Чем сложнее система, тем большими индивидуальными особенностями она обладает.

Однако сложные системы обладают и такими свойствами, которые положительно влияют на их надежность:

- во-первых, сложным системам свойственна самоорганизация, саморегулирование или самоприспособление, когда система способна найти наиболее устойчивое для своего функционирования состояние;

- во-вторых, для сложной системы часто возможно восстановление работоспособности по частям, без прекращения ее функционирования;

- в-третьих, не все элементы системы одинаково влияют на надежность сложной системы.

Анализ работоспособности сложной системы связан с изучением ее структуры и тех взаимосвязей, которые определяют ее надежное функционирование.

При анализе надежности сложных систем их разбивают на элементы (компоненты) с тем, чтобы вначале рассмотреть параметры и характеристики элементов, а затем оценить работоспособность всей системы. Под элементом можно понимать составную часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами. При исследовании надежности системы элемент не расчленяется на составные части, и показатели безотказности и долговечности относятся к элементу в целом. При этом возможно восстановление работоспособности элемента независимо от других частей и элементов системы.

Анализ надежности сложных систем имеет свои специфические особенности. Влияние различных отказов и снижение работоспособности элементов системы по-разному скажутся на надежности всей системы.

При анализе надежности сложной системы все ее элементы и компоненты целесообразно разделить на следующие группы.

- 1) Элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность системы (деформация ограждающего кожуха машины, изменение окраски поверхности и т.п.). Отказы (т.е. неисправное состояние) этих элементов могут рассматриваться изолированно от системы.

- 2) Элементы, работоспособность которых за рассматриваемый период времени практически не изменяется (станины и корпусные детали, малонагруженные элементы с большим запасом прочности).

- 3) Элементы, ремонт или регулировка которых возможна при работе изделия или во время остановок, не влияющих на его эффективность (подналадка и замена режущего инструмента на станке, регулировка холостого хода карбюратора автомобильного двигателя).

- 4) Элементы, отказ которых приводит к отказам системы.

Таким образом, рассмотрению и анализу надежности подлежат лишь элементы последней группы. Как правило, имеется ограниченное число элементов, которые в основном

и определяют надежность изделия. Эти элементы и подсистемы выявляются при рассмотрении структурной схемы параметрической надежности.

*Модели надежности* устанавливают связь между подсистемами (или элементами системы) и их влиянием на работу всей системы. *Структурная схема надежности* определяет функциональную взаимосвязь между работой подсистем (или элементов) в определенной последовательности. Эту схему составляют по принципу функционального назначения соответствующих подсистем (или элементов) при выполнении ими определенной части работы, выполняемой системой в целом. Техническая система может быть сконструирована таким образом, что для успешного ее функционирования необходима исправная работа всех ее элементов. В этом случае ее называют *последовательной системой*. Есть также системы, в которых при отказе одного элемента другой элемент способен выполнить его функции. Таковую систему называют *параллельной*. Очень часто системы обладают свойствами как параллельных, так и последовательных систем — *системы со смешанным соединением*. При расчете надежности необходимо исследовать действия системы, основываясь на ее функциональной структуре и используя вероятностные соотношения.

Такое исследование структуры позволяет выявить узкие места в конструкции системы с точки зрения ее надежности, а на этапе проектирования разработать конструктивные меры по устранению подобных узких мест. Например, можно заранее подсчитать, сколько резервных элементов необходимо для обеспечения заданного уровня надежности системы. Далее можно рассчитать надежность системы, построенной из элементов с известной надежностью, или наоборот, исходя из требования к надежности системы, предъявить требования к надежности элементов.

## **7.2. Структурная схема надежности системы с последовательным соединением элементов**

Имеются структурные схемы надежности системы с последовательным соединением элементов (рис. 6.1), когда отказ одного элемента вызывает отказ другого элемента, а затем третьего и т.д. Например, большинство приводов машин и механизмы передач подчиняются этому условию. Так, если в приводе машины выйдет из строя любая шестерня, подшипник, муфта, рычаг управления, электродвигатель, насос смазки, то весь привод перестанет функционировать. При этом отдельные элементы в этом приводе не обязательно должны быть соединены последовательно.

Таковую структурную схему называют *схемой с последовательным соединением зависимых элементов*. В этом случае надежность системы определяют по теореме умножения для *зависимых событий*.

Рассмотрим систему, состоящую из двух или более элементов. Пусть  $A$  — событие, состоящее в том, что система работает безотказно, а  $A_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) — события, состоящие в исправной работе всех ее элементов. Далее предположим, что событие  $A$  имеет место тогда и только тогда, когда имеют место все события  $A_i$ , т.е. система исправна тогда и только тогда, когда исправны все ее элементы. В этом случае систему называют *последовательной системой*.

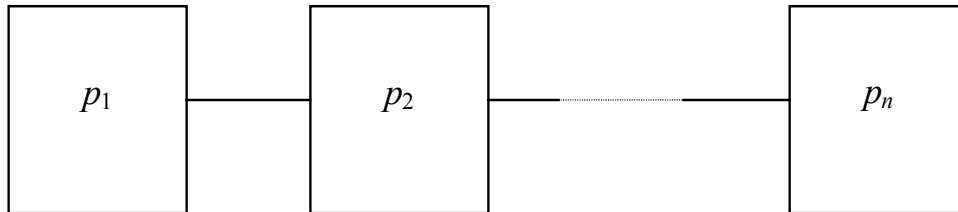


Рис.7.1. Структурная схема надежности системы с последовательным соединением элементов

Известно, что отказ любого элемента такой системы приводят, как правило, к отказу системы. Поэтому вероятность безотказной работы системы определяют как произведение вероятностей для *независимых событий*.

Таким образом, надежность всей системы равна произведению надежностей подсистем или элементов:

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (7.1)$$

Обозначив  $P(A) = P$ ;  $P(A_i) = p_i$ , получим

$$P = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (7.2)$$

где  $P$  — надежность.

Сложные системы, состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью за счет наличия большого числа элементов. Например, если узел состоит всего из 50 деталей, а вероятность безотказной работы каждой детали за выбранный промежуток времени составляет  $P_i = 0,99$ , то вероятность безотказной работы узла будет  $P(t) = (0,99)^{50} = 0,55$ .

Если же узел с аналогичной безотказностью элементов состоит из 400 деталей, то  $P(t) = (0,99)^{400} = 0,018$ , т.е. узел становится практически неработоспособным.

**Пример 7.1.** Определить надежность автомобиля (системы) при движении на заданное расстояние, если известны надежности следующих подсистем: системы зажигания  $p_1 = 0,99$ ; системы питания топливом и смазкой  $p_2 = 0,999$ ; системы охлаждения  $p_3 = 0,998$ ; двигателя  $p_4 = 0,985$ ; ходовой части  $p_5 = 0,997$ .

Решение. Известно, что отказ любой подсистемы приводит к отказу автомобиля. Для определения надежности автомобиля используем формулу (7.2)

$$P = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 = 0,99 \cdot 0,999 \cdot 0,998 \cdot 0,985 \cdot 0,997 = 0,979.$$

Ответ:  $P = 0,979$ .

### 7.3. Структурные схемы надежности систем с параллельным соединением элементов

В практике проектирования сложных технических систем часто используют схемы с *параллельным соединением элементов* (рис. 7.2.), которые построены таким образом, что отказ системы возможен лишь в случае, когда отказывают все ее элементы, т.е. система исправна, если исправен хотя бы один ее элемент. Такое соединение часто называют *резервированием*. В большинстве случаев резервирование оправдывает себя, несмотря на увеличение стоимости. Наиболее выгодным является *резервирование отдельных элементов*, которые непосредственно влияют на выполнение основной работы. При конструировании технических систем в зависимости от выполняемой системой задачи применяют горячее или холодное резервирование.

*Горячее резервирование* применяют тогда, когда не допускается перерыв в работе на переключение отказавшего элемента на резервный с целью выполнения задачи в установленное время. Чаще всего горячему резервированию подвергают отдельные элементы. Используют горячее резервирование элементов и подсистем, например источников питания (аккумуляторные батареи дублируются генератором и т.п.).

*Холодное резервирование* используют в тех случаях, когда необходимо увеличение ресурса работы элемента, и поэтому предусматривают время на переключение отказавшего элемента на резервный.

Существуют технические системы с *частично параллельным резервированием*, т. е. системы, которые оказываются работоспособными даже в случае отказа нескольких элементов.

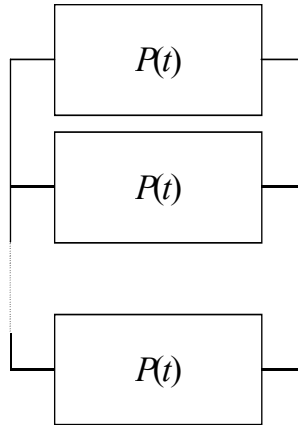


Рис. 7.2. Структурная схема надежности системы с параллельным соединением элементов

Рассмотрим систему, имеющую ряд параллельных элементов с надежностью  $p(t)$  и соответственно ненадежностью  $q(t) = 1 - p(t)$ . В случае, если система содержит  $n$  элементов, которые соединены параллельно, вероятность отказа системы равна:

$$Q = [q(t)]^n, \quad (7.3)$$

а вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - [q(t)]^n. \quad (7.4)$$

При частично параллельном резервировании вероятность безотказной работы системы, состоящей из общего числа элементов  $n$ , определяют по формуле:

$$P(t) = \sum_{k=j}^n C_n^k p^k(t) q^{n-k}(t), \quad (7.5)$$

где  $p(t)$  — вероятность безотказной работы одного элемента;  $j$  — число исправных элементов, при котором обеспечивается работоспособность системы;  $C_n^k = n!/[k!(n-k)!]$  — число сочетаний из  $n$  элементов по  $k$ .

В случае  $j = 1$  система будет полностью параллельной, в остальных случаях — частично параллельной.

#### 7.4. Структурные схемы надежности систем с другими видами соединения элементов

Следует отметить, что в практике проектирования технических систем часто используют структурные схемы надежности с *параллельно-последовательным соединением* элементов. Так, например, часто при проектировании систем с радиоэлектронными элементами применяют схемы, работающие по принципу два из трех, когда работоспособность обеспечивается благодаря исправному состоянию любых двух элементов. Надежность такой схемы соединения определяют по формуле

$$P(T) = P^3(T) + 3P^2(T)Q(T). \quad (7.6)$$

где  $p(t)$  — надежность каждого элемента за время работы  $t$  одинакова;  $q(t) = 1 - p(t)$ .

Широкое применение в проектировании нашли так называемые *мостиковые схемы*. Надежность такой схемы определяют из соотношения вида



$$P(t) = p^5(t) + 5p^4(t)q(t) + 8p^3(t)q^2(t) + 2p^2(t)q^3(t). \quad (7.7)$$

Здесь все элементы также имеют одинаковую надежность.

Различают структурные схемы надежности с поканальным и поэлементным резервированием.

Структурная схема надежности с поканальным резервированием показана на рис. 6.3.

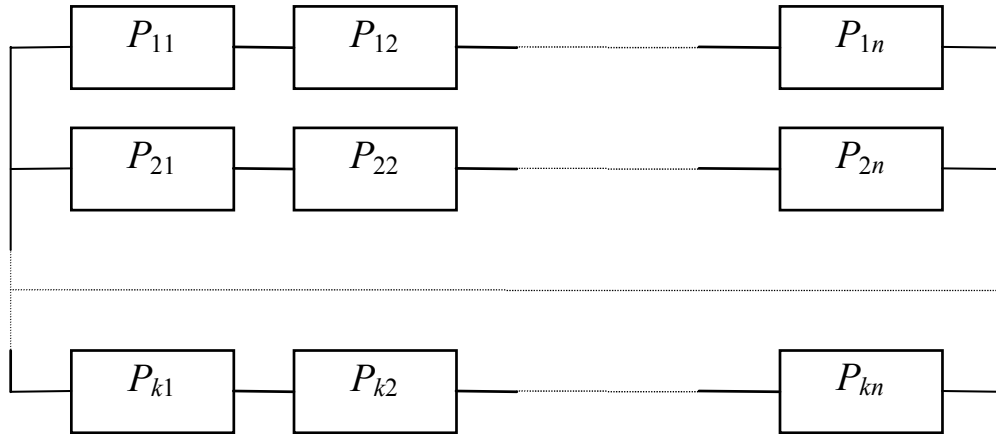


Рис. 7.3. Структурная схема надежности с поканальным резервированием

Формула надежности выглядит так:

$$P = [1 - (1 - p_{11} p_{12} \dots p_{1n})(1 - p_{21} p_{22} \dots p_{2n})(1 - p_{k1} p_{k2} \dots p_{kn})] \quad (7.8)$$

При  $p_{ij} = p_j$

$$P = 1 - (1 - p_1 p_2 \dots p_n)^k \quad (7.9)$$

Если  $p_{ij} = p$ , то

$$P = 1 - (1 - p^n)^k \quad (7.10)$$

В практике проектирования часто используют структурную схему надежности с поэлементным резервированием (рис. 6.4).

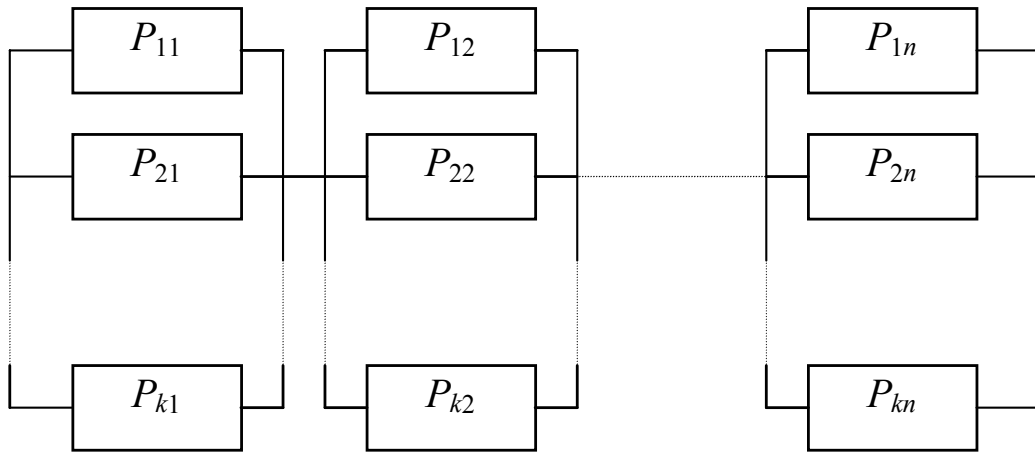


Рис.7.4. Структурная схема надежности с поэлементным резервированием

Надежность такой системы определяют по формуле:

$$P = [1 - (1 - p_{11})(1 - p_{21}) \dots (1 - p_{k1})][1 - (1 - p_{12})(1 - p_{22}) \dots (1 - p_{k2})] \dots [1 - (1 - p_{1n})(1 - p_{2n}) \dots (1 - p_{kn})]. \quad (7.11)$$

При  $p_{ij} = p_j$

$$P = [1 - (1 - p_1)^k][1 - (1 - p_2)^k] \dots [1 - (1 - p_n)^k]. \quad (7.12)$$

Если  $p_{ij} = p$ , то

$$P = [1 - (1 - p)^k]^n. \quad (7.13)$$

Анализ последних двух схем показывает, что структурная схема с поэлементным резервированием имеет более высокую надежность по сравнению с поканальным резервированием.

**Пример 7.2.** Техническая система предназначена для выполнения некоторой задачи. С целью обеспечения работоспособности система спроектирована со смешанным соединением элементов (рис. 7.5.).

Определить надежность системы, если известно, что надежность ее элементов равна:  $p_1=0,99$ ;  $p_2=0,98$ ;  $p_3=0,9$ ;  $p_4=0,95$ ;  $p_5=0,9$ ;  $p_6=0,9$ ;  $p_7=0,8$ ;  $p_8=0,75$ ;  $p_9=0,7$ .

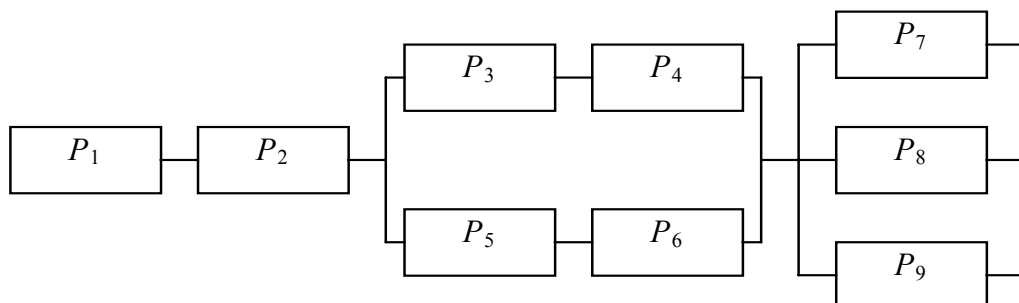


Рис. 7.5. Структурная схема надежности технической системы

Решение. При расчете надежности воспользуемся формулами как для последовательного, так и для параллельного соединения элементов:

$$P = p_1 p_2 [1 - (1 - p_3 p_4)(1 - p_5 p_6)][1 - (1 - p_7)(1 - p_8)(1 - p_9)] =$$

$$= 0,99 \cdot 0,98 [1 - (1 - 0,9 \cdot 0,95)(1 - 0,9 \cdot 0,9)] [1 - (1 - 0,8)(1 - 0,75)(1 - 0,7)] = 0,927.$$

При расчете схемной надежности данную систему представляют в виде структурной схемы, в которой элементы, отказ которых приводит к отказу всей системы, изображаются последовательно, а резервные элементы или цепи – параллельно. Следует иметь в виду, что конструктивное оформление элементов, их последовательное или параллельное соединение в конструкции еще не означает аналогичного изображения в структурной схеме надежности.

Разницу между конструктивной (монтажной) и структурной схемами можно показать на примере работы двух фильтров гидросистемы, которые для повышения надежности работы системы могут быть установлены (рис.7.6) последовательно или параллельно.

Отказ фильтра может произойти в результате двух основных причин – засорения сетки и ее разрыва.

В случае засорения сетки структурная схема надежности соответствует конструктивной. Последовательное соединение фильтров в этом случае только снизит надежность системы, так как отказ любого из фильтров приведет к отказу системы, поскольку необходимый поток жидкости не будет проходить сквозь фильтр.

Конструктивная схема	Структурная схема	
	Засорение сетки	Разрыв сетки

Рис.7.6. Конструктивные и структурные схемы надежности соединения фильтров при различных видах отказов

При отказе фильтра из-за разрыва сетки структурная схема надежности противоположна конструктивной. При параллельном конструктивном выполнении отказ любого фильтра будет означать отказ системы, так как при разрыве сетки поток жидкости пойдет через данный фильтр и не будет происходить ее фильтрация. Поэтому структурная схема надежности изображена в виде последовательных элементов. При последовательном конструктивном включении фильтров, наоборот, разрыв сетки одного из них не будет означать отказа, поскольку дублирующий фильтр продолжает выполнять свои функции. Поэтому структурная схема надежности изображена в виде параллельного соединения.

### 7.5. Зависимости для расчета вероятности безотказной работы по заданному критерию

Работоспособность механических узлов и металлоконструкций характеризуется рядом критериев (параметров) — прочностью, износостойкостью, жесткостью, устойчивостью, точностью и др. Расчет надежности основывается на сравнении расчетного значения задан-

ного критерия с его предельным значением, выбираемым по нормативным или справочным данным или устанавливаемым при испытаниях или наблюдениях в эксплуатации.

Работоспособность деталей или узлов оценивают по заданному критерию, если расчетное его значение  $Y$  меньше предельного  $Y_n$ . В общем случае значение  $Y$  не должно превышать предельного значения. Таким образом, для обеспечения работоспособности заранее задают коэффициент безопасности  $n = Y_n/Y$ . Расчетные параметры рассматривают как детерминированные величины, хотя в действительности они имеют рассеяние. Поэтому расчет проводят по наиболее неблагоприятным значениям параметров, при этом истинное значение коэффициента безопасности остается неизвестным.

С переходом на вероятностные методы расчета параметры  $Y$  и  $Y_n$  рассматривают как случайные величины, и вероятность безотказной работы  $P$  по заданному критерию определяют по табл. П.1 приложения в зависимости от квантили:

$$u_p = (Y_{n.c.p} - Y_{c.p}) / (\sigma_n^2 + \sigma_Y^2)^{1/2} \quad (7.14)$$

где  $u_p$  — квантиль нормированного нормального распределения;  $Y_{c.p}$  и  $Y_{n.c.p}$  — средние значения величин  $Y$  и  $Y_n$ ;  $\sigma_n$  и  $\sigma_Y$  — средние квадратические отклонения величин  $Y_n$  и  $Y$ .

Соотношение (7.14) можно выразить через коэффициент безопасности и коэффициенты вариации, разделив числитель и знаменатель дроби на  $Y_{c.p}$ :

$$u_p = (n - 1) / (n^2 \cdot v_n^2 + v_Y^2)^{1/2} \quad (7.15)$$

где  $n = Y_n/Y$ ,  $v_n = \sigma_n/Y_{n.c.p}$ ,  $v_Y = \sigma_Y/Y_{c.p}$ .

В общем случае параметр  $Y$  может быть выражен функциональной зависимостью

$$Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7.16)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — случайные факторы.

Среднее значение  $Y_{c.p}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_Y$  параметра  $Y$  как известной функции случайных аргументов определяют по следующей зависимости:

$$Y_{c.p} = \varphi(x_{1c.p}, x_{2c.p}, \dots, x_{nc.p}) \quad (7.17)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2},$$

где  $\partial \varphi / \partial x_i$  — частная производная функции  $\varphi$  по фактору  $x_i$ , в которую подставляют средние значения факторов  $x_{1c.p}, x_{2c.p}, \dots, x_{nc.p}$ ;  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  — средние квадратические отклонения факторов.

## 7.6. Проектный расчет надежности технической системы

Известно, что техническая система, как правило, состоит из большого числа подсистем, которые между собой имеют определенную взаимную связь. Приступая к расчету надежности системы, предварительно устанавливают последовательность включения отдельных подсистем, а затем составляют функциональную схему работы системы во времени при выполнении поставленной задачи.

Надежность системы рассчитывают в каждом интервале времени, в котором задействованы определенные подсистемы, при этом суммарное время работы системы будет соответствовать времени выполнения поставленной задачи. Не исключено, что отдельные подсистемы могут работать в течение всего периода времени выполнения поставленной перед системой задачи. В этом случае вероятность безотказной работы системы в течение всего временного интервала определяется выражением вида

$$P(t) = p_1(t_1) p_2(t_2) \dots p_n(t_n),$$

где  $t_1, t_2, \dots, t_n$  — интервалы времени, соответствующие вероятностям  $p_1, p_2, \dots, p_n$ .

Для определения вероятностей  $p_1(t_1), p_2(t_2) \dots p_n(t_n)$  для каждого интервала времени работы системы составляют структурные схемы надежности. Расчет надежности на этапе проектирования проводят по справочным данным интенсивностей отказов элементов или используют статистические данные, полученные по результатам испытаний или эксплуатации элементов-аналогов в составе системы.

Порядок расчета надежности по справочным данным сводится к следующему.

В зависимости от заданных условий эксплуатации системы (температуры, влажности, нагрузки и др.) взятые из справочников по надежности значения интенсивностей отказов умножают на коэффициент условий применения  $K_y$ , который может быть больше или меньше единицы. Необходимо помнить, что справочные данные по интенсивностям отказов приводятся в основном для элементов электроавтоматики, так как эти элементы стандартизованы и выпускаются предприятиями промышленности с использованием примерно одной технологии, а следовательно, и интенсивности их отказов мало отличаются.

Таким образом, чтобы установить интенсивность отказов элементов электроавтоматики, необходимо выполнить следующие этапы:

- 1) составить перечень элементов, указывая их название, а также число элементов, входящих в состав системы;
- 2) определить по справочнику интенсивности отказов;
- 3) найти коэффициенты условий применения  $K_y$  с помощью соответствующего расчета или графика по справочнику, учитывая нагрузку, температуру и др.;
- 4) перемножить интенсивности отказов на множители  $K_y$ . Это и будет интенсивность отказов при использовании элемента в данных условиях.

Такую же процедуру осуществляют для всех элементов системы.

Для проведения расчета составляют таблицу справочных данных, примером которой является табл. 7.1.

Таблица 7.1

*Справочные данные для расчета надежности системы*

Название и обозначение элемента	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6, \text{ч}^{-1}$	Коэффициент условий применения $K_y$	Число $n$ элементов в системе	Суммарная интенсивность отказов $n K_y \lambda \cdot 10^6, \text{ч}^{-1}$
Диод 2Д 106	208,0	1,5	10	3120,0
Реле РЭС47	43,5	1,2	5	261,0
Датчик температуры ТС-37	60,8	1,0	2	121,6

Так как в процессе эксплуатации элементы системы находятся как в рабочем состоянии, так и в состоянии хранения и транспортирования, то используют следующие формулы пересчета интенсивностей отказов:

$$\lambda_x = \lambda \cdot 10^{-3}; \quad \lambda_T = 1,5\lambda; \quad \lambda_{T,x} = 1,5\lambda_x. \quad (7.18)$$

При показательном законе распределения времени безотказной работы надежность элемента определяется из соотношения вида

$$p_i(t) = \exp(-\lambda_i t + \lambda_{iT} t_T + \lambda_{iX} t_X) \quad (7.19)$$

При  $(-\lambda_i t + \lambda_{iT} t_T + \lambda_{iX} t_X) \ll 1$

$$p_i(t) \approx 1 - (-\lambda_i t + \lambda_{iT} t_T + \lambda_{iX} t_X) \quad (7.20)$$

Приближенное значение среднего квадратического отклонения

$$\sigma_{p(t)} = (\lambda_i + \lambda_{iT} + \lambda_{iX}) = - \ln p_i(t)/t. \quad (7.21)$$

Тогда вероятность безотказной работы и среднее квадратическое отклонение системы, состоящей из последовательно соединенных элементов, определяют соответственно по формулам:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t) = \exp[- \sum_{i=1}^N (\lambda_i t + \lambda_{iT} + \lambda_{iX} t)], \quad (7.22)$$

$$\sigma_{P(t)} = [\sum_{i=1}^N \sigma_{p(t)}^2]^{1/2} = [\sum_{i=1}^N (\lambda_i + \lambda_{iT} + \lambda_{iX})^2]^{1/2}. \quad (7.23)$$

При расчете надежности механических, гидравлических и пневматических элементов и узлов чаще всего используют статистические данные по испытаниям или эксплуатации элементов-аналогов. При наличии статистических данных вероятность безотказной работы элемента вычисляют по формуле

$$p_i(t) = 1 - m_i/n_i, \quad (7.24)$$

где  $t$  - время одного цикла испытаний (работы);  $m_i$  и  $n_i$  - соответственно число отказов и объем испытаний  $i$ -го элемента.

В случае, если  $m_i = 0$ , то

$$p_i(t) = 1 - 1/[2(n_i + 2)]. \quad (7.25)$$

Среднее квадратическое отклонение элемента определяют с помощью соотношений:

$$\sigma_{p(t)} = \{p_i(t)[1 - p_i(t)]/(n_i - 1)\}^{1/2} \quad \text{при } m_i \neq 0; \quad (7.26)$$

$$\sigma_{p(t)} = [1/2(n_i + 2)][(5n_i + 7)/(n_i + 3)]^{1/2} \quad \text{при } m_i = 0. \quad (7.27)$$

Вероятность безотказной работы и среднее квадратическое отклонение для системы, состоящей из последовательно соединенных элементов, вычисляют соответственно по формулам:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t) = 1 - \sum_{i=1}^N m_i/n_i; \quad (7.28)$$

$$\sigma_{P(t)} = [\sum_{i=1}^N \sigma_{p(t)}^2]^{1/2}. \quad (7.29)$$

Если в системе предусмотрены различные виды резервирования, то при расчете надежности используют соответствующие формулы.

Для *восстанавливаемых систем* одним из основных показателей надежности является коэффициент готовности. Расчет коэффициента и его среднего квадратического отклонения проводят по формулам:

$$K_r = 1 - K_p - K_{\text{пер}}, \quad (7.30)$$

где  $K_p$  - коэффициент ремонта системы:

$$K_p = \sum_{i=1}^N K_{ip}, \quad (7.31)$$

здесь  $K_{ip}$  - коэффициент ремонта  $i$ -го элемента:

$$K_{ip} = T_{ip} / T_{i3}, \quad (7.32)$$

где  $T_{ip}$  - среднее время непланового ремонта  $i$ -го элемента за период его эксплуатации  $T_{i3}$ :

$$T_{ip} = T_{iB} q_i S_i, \quad (7.33)$$

здесь  $T_{iB}$  - среднее время восстановления одного отказа;  $q_i$  - вероятность отказа  $i$ -го элемента за время  $t_{ц}$  одного цикла работы;  $S_i$  - число циклов работы  $i$ -го элемента:

$$S_i = T_{i3}/t_{ц}. \quad (7.34)$$

Формулы (7.32) - (7.34) справедливы для элементов, которые не контролируются в процессе их работы.

Для непрерывно контролируемых элементов коэффициент ремонта определяют по формуле

$$K_{ip} = T_{iB}/(T_{iB} + T_i), \quad (7.35)$$

где  $T_i$  - среднее значение наработки на отказ  $i$ -го элемента.

Среднее квадратическое отклонение коэффициента ремонта

$$\sigma_{Kip} = (\sum_{i=1}^N \sigma_{Kip}^2)^{1/2}, \quad (7.36)$$

где  $\sigma_{Kip} \approx K_{ip}$ ;

а коэффициент регламента – по формуле

$$K_{per} = T_{per}/T_3, \quad (7.37)$$

где  $T_{per}$  — время, затраченное на проведение регламента за период эксплуатации  $T_3$ .

**Пример 7.3.** В соответствии с техническим заданием разработана конструкторская документация на изделие типа подвижной установки. Выполнить расчет вероятности безотказной работы и коэффициента готовности, а также найти их средние квадратические отклонения при следующих исходных данных:  $t = 6$  ч – время работы в течение суток (принимается пятидневная рабочая неделя);  $T_{per} = 240$  ч – время регламента (технического обслуживания), предусмотренное после каждого года эксплуатации ( $T_3 = 8760$  ч).

Для удобства используем сокращения: ц. – цикл; от. – отказ.

Решение. По результатам анализа конструкторской документации установлено, что все элементы и узлы подвижной установки при выполнении ею работы функционируют в течение 6 ч в сутки. Составим структурную схему надежности изделия (рис. 7.7.).



Рис. 7.7. Структурная схема надежности изделия

Для расчета надежности элементов 1-3 структурной схемы используем статистические данные, полученные при испытаниях, а расчет надежности элемента 4 проводим по справочным данным.

Расчет надежности элемента 1. В соответствии с данными, полученными при эксплуатации металлоконструкций аналогичных изделий, предположим, что  $m_1 = 5$  от.;  $n_1 = 5000$  ц.;  $t_{ц} = 6$  ч (длительность одного цикла работы) и  $t_{iB} = 20$  ч (среднее время восстановления одного отказа). Далее, подставляя исходные данные в формулы (7.24) и (7.26), определим  $p_1(t)$  и  $\sigma_{p1(t)}$ :

$$p_1(t) = 1 - m_1/n_1 = 1 - 5/5000 = 0,999;$$

$$\sigma_{p1(t)} = \{p_1(t)[1 - p_1(t)]/(n_1 - 1)\}^{1/2} = [0,999 \cdot 0,001/(5000 - 1)]^{1/2} = 0,004/$$

Для вычисления коэффициента ремонта и его среднего квадратического отклонения используем соотношения:

$$K_{1p} = T_{1p}/T_{1э} = m_1 t_{1в}/(n_1 t_{1ц}) = 5 \cdot 20/(5000 \cdot 6) = 0,0033;$$

$$\sigma_{K1p} = K_{1p} = 0,0033.$$

Расчет надежности элемента 2. По результатам эксплуатации механических узлов аналогичных изделий имеем:  $m_2 = 8$  от.;  $n_2 = 4000$  ц.;  $t_{1ц} = 6$  ч и  $t_{2в} = 10$  ч.

Подставляя исходные данные в известные формулы, получим:

$$p_2(t) = 1 - m_2/n_2 = 1 - 8/4000 = 0,998;$$

$$\sigma_{p2(t)} = \{p_2(t)[1 - p_2(t)]/(n_2 - 1)\}^{1/2} = [0,998 \cdot 0,002/(4000 - 1)]^{1/2} = 0,006;$$

$$K_{2p} = T_{2p}/T_{2э} = m_2 t_{2в}/(n_2 t_{1ц}) = 8 \cdot 10/(6000 \cdot 6) = 0,0033;$$

$$\sigma_{K2p} = K_{2p} = 0,0033.$$

Расчет надежности элемента 3. По результатам эксплуатации гидравлических узлов аналогичных изделий имеем:  $m_3 = 15$  от.;  $n_3 = 3000$  ц.;  $t_{1ц} = 6$  ч;  $t_{3в} = 6$  ч.

Подстановка исходных данных в известные формулы позволяет рассчитать:

$$p_3(t) = 1 - m_3/n_3 = 1 - 15/3000 = 0,995;$$

$$\sigma_{p3(t)} = \{p_3(t)[1 - p_3(t)]/(n_3 - 1)\}^{1/2} = [0,995 \cdot 0,005/(3000 - 1)]^{1/2} = 0,001;$$

$$K_{3p} = T_{3p}/T_{3э} = m_3 t_{3в}/(n_3 t_{1ц}) = 15 \cdot 6/(3000 \cdot 6) = 0,005;$$

$$\sigma_{K3p} = K_{3p} = 0,005.$$

Расчет надежности элемента 4. Структурная схема надежности электроавтоматики (рис. 7.8) представляет собой смешанное соединение элементов.



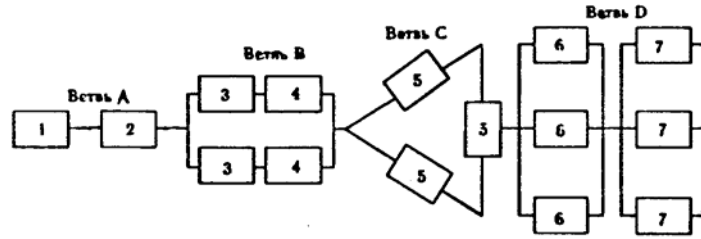


Рис. 7.8. Структурная схема надежности электроавтоматики

Составим таблицу исходных данных интенсивностей отказов (табл. 7.2.).

Для расчета надежности элемента 4 представим структурную схему в виде четырех ветвей *A*, *B*, *C* и *D* и определим надежность каждой ветви.

Таблица 7.2

Исходные данные для расчета надежности

Название элемента на схеме	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6, \text{ч}^{-1}$	Коэффициент условий применения $K_y$	Число $n$ элементов в системе	Суммарная интенсивность отказов $nK_y\lambda \cdot 10^6, \text{ч}^{-1}$
1. Резистор	87,0	1,0	5	435,00
2. Электромагнит	173,7	1,5	10	2605,50
3. Диод 2Д106А	208,0	1,5	1	312,00
4. Диод 2Д106А	208,0	1,5	1	312,00
5. Реле РЭС 47	43,4	1,2	1	52,08
Контактор	870,0	1,0	1	870,00
7. Датчик температуры ТС-37	608,0	1,0	1	608,00

Ветвь А.

$$P_A(t) = \exp[-\Sigma(\lambda_p t + \lambda_x t_x)] = 1 - \Sigma(\lambda_p t + \lambda_x t_x) = 1 - [(435 + 2605,5) \cdot 6 + (435 + 2605,5) \cdot 18 \cdot 10^{-3}] \cdot 10^{-6} = 1 - (0,018 + 0,000054) = 0,98;$$

$$\sigma_{P_A(t)} = \lambda_p + \lambda_x = -\ln P_A(t)/t = -\ln 0,98/6 = 0,0202/6 = 0,0033.$$

где  $\lambda_p$  – интенсивность отказов при работе;  $\lambda_x$  – интенсивность отказов при хранении.

Ветвь В (поканальное резервирование). Для расчета используем формулы:

$$P_B(t) = 1 - [1 - p(t)]^2 = 1 - (1 - 0,9963)^2 = 0,99999;$$

$$p(t) = \exp[-\Sigma(\lambda_p t + \lambda_x t_x)] \approx 1 - \Sigma(\lambda_p t + \lambda_x t_x) \approx 1 - [(312+312) \cdot 6 + (312+312) \cdot 18 \cdot 10^{-3}] \cdot 10^{-6} \approx 1 - (0,0037+0,000011) \approx 0,9963;$$

$$\sigma_{P_B(t)} = -\ln P_B(t)/t = 0,00005/6 = 0,000008.$$

Ветвь С (схема два из трех). При расчете используем формулу для схемы два из трех:

$$P_C(t) = p^3(t) + 3 p^2(t)q(t) = 0,9997^3 + 3 \cdot 0,9997^2 \cdot 0,0003 = 0,9999;$$

$$p(t) = \exp[-(\lambda_p t + \lambda_x t_x)] = \exp[-(52,08 \cdot 6 + 52,08 \cdot 18 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{-6}] = 0,9997;$$

$$\sigma_{P_C(t)} = -\ln P_C(t)/t = 0,0001/6 = 0,00001.$$

Ветвь D (поэлементное резервирование). При расчете воспользуемся формулой (7.12):

$$P_D(t) = \{1 - [1 - p_6(t)]^3\} \{1 - [1 - p_7(t)]^3\} = (1 - 0,125 \cdot 10^{-6})(1 - 0,064 \cdot 10^{-6}) = 0,999999;$$

$$p_6(t) = \exp[-(\lambda_p t + \lambda_x t_x)] = 1 - (\lambda_p t + \lambda_x t_x) = 1 - (870 \cdot 6 + 870 \cdot 10^{-3} \cdot 18) \cdot 10^{-6} = 0,995;$$

$$p_7(t) = \exp[-(\lambda_p t + \lambda_x t_x)] = 1 - (\lambda_p t + \lambda_x t_x) = 1 - (608 \cdot 6 + 608 \cdot 10^{-3} \cdot 18) \cdot 10^{-6} = 0,996;$$

$$\sigma_{P_D(t)} = -\ln P_D(t)/t = 0,000001/6 = 0,016 \cdot 10^{-6}.$$

Надежность электроавтоматики равна:

$$p_4(t) = P_A(t) P_B(t) P_C(t) P_D(t) = 0,98 \cdot 0,99999 \cdot 0,99999 \cdot 0,99999 = 0,979;$$

$$\begin{aligned} \sigma_{p_4(t)} &= [\sigma_{P_A(t)}^2 + \sigma_{P_B(t)}^2 + \sigma_{P_C(t)}^2 + \sigma_{P_D(t)}^2]^{1/2} = \\ &= [(3,3 \cdot 10^{-3})^2 + (0,8 \cdot 10^{-5})^2 + (1 \cdot 10^{-5})^2 + (0,016 \cdot 10^{-6})^2]^{1/2} \approx 0,0033. \end{aligned}$$

Из практики известно, что среднее время восстановления электроавтоматики  $T_{4в} = 5$  ч.

Используя формулу (7.35), вычислим коэффициент ремонта

$$K_{4р} = T_{4в} / (T_{4в} + T_4) = 5 / (5 + 153,8) = 0,031,$$

где  $1/T_4 = -\ln P_4(t)/t = -\ln 0,979/6 = 0,021/6 = 0,0065$  1/ч;

$$T_4 = 1/0,0065 = 153,8 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы и среднее квадратическое отклонение изделия в целом соответственно равны:

$$P(t) = p_1(t) p_2(t) p_3(t) p_4(t) = 0,999 \cdot 0,998 \cdot 0,995 \cdot 0,979 = 0,971;$$

$$\begin{aligned} \sigma_{P(t)} &= [\sigma_{P_1(t)}^2 + \sigma_{P_2(t)}^2 + \sigma_{P_3(t)}^2 + \sigma_{P_4(t)}^2]^{1/2} = \\ &= (0,004^2 + 0,006^2 + 0,001^2 + 0,0033^2)^{1/2} = 0,008. \end{aligned}$$

По формуле (7.31) найдем коэффициент ремонта изделия

$$K_p = \sum_{i=1}^4 K_{ip} = 0,0033 + 0,0033 + 0,005 + 0,031 = 0,0426;$$

по формуле (7.36) - среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{K_p} = (\sum_{i=1}^4 K_{ip}^2)^{1/2} = (0,0033^2 + 0,0033^2 + 0,005^2 + 0,031^2)^{1/2} = 0,037.$$

Далее по формуле (7.37) вычислим коэффициент регламента

$$K_{\text{рег}} = T_{\text{рег}}/T_3 = 240/8760 = 0,027.$$

Из соотношения (7.30) определим коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = 1 - K_p - K_{\text{рег}} = 1 - 0,0426 - 0,027 = 0,93.$$

Среднее квадратическое отклонение коэффициента готовности принимаем равным среднему квадратическому отклонению коэффициента ремонта:

$$\sigma_{K_{\Gamma}} = \sigma_{K_p} = 0,037.$$

Ответ:  $P(t) = 0,971$ ;  $\sigma_{P(t)} = 0,008$ ;  $K_{\Gamma} = 0,93$ ;  $\sigma_{K_{\Gamma}} = 0,037$ .

### 7.7. Применение теории надежности для оценки безопасности технических систем

Обеспечение безопасности машин и конструкций – составная часть проблемы надежности. Под безопасностью понимаем надежность по отношению к жизни и здоровью людей, состоянию окружающей среды.

Вероятностно-статистические методы и теория надежности начали широко использоваться при расчете особо ответственных объектов, при анализе крупных аварий.

Основным базовым показателем надежности и безопасности технических систем может служить вероятность безотказной работы  $P(t)$  – вероятность проведения производственных процессов без происшествий в течение некоторого времени  $t$ , т.е. того, что в заданном интервале времени  $t = T$  не возникнет отказа этого объекта.

Значение  $P(t)$ , как всякой вероятности, может находиться в пределах  $0 \leq P(t) \leq 1$ . Вероятность безотказной работы  $P(t)$  и вероятность отказа  $R(t)$  образуют полную группу событий, поэтому

$$P(t) + R(t) = 1. \quad (7.38)$$

Допустимое значение  $P(t)$  выбирается в зависимости от степени опасности отказа объекта. Например, для ответственных изделий авиационной техники допустимые значения  $P(t) = 0,9999$  и выше, т.е. практически равны единице.

При высоких требованиях к надежности объекта задаются допустимым значением  $P(t) = \gamma\%$  ( $\gamma\%$  – вероятность безотказной работы объекта в %) и определяют время работы объекта  $t = T_{\gamma}$ , соответствующее данной регламентированной вероятности безотказной работы. Значение  $T_{\gamma}$  называется «гамма-процентным ресурсом» и по его значению судят о большей или меньшей безотказности и безопасности объектов.

Пусть  $R(t)$  – вероятность возникновения аварийной ситуации на отрезке времени  $[0, t]$ . Эта вероятность должна удовлетворять условию

$$R(T_*) \leq R_*, \quad (7.39)$$

где  $R_*$  – предельно допустимое (нормативное) значение риска возникновения аварийной ситуации.

Используем нормативное значение вероятности безотказной, т.е. безопасной, работы  $P_*$ , которая весьма близка к единице (например,  $P_* \cong 1$ ).

Функция риска на отрезке времени  $[0, t]$  дополняет функцию безопасности  $P(t)$  до единицы:

$$R(t) = 1 - P(t). \quad (7.40)$$

Интенсивность риска аварийной ситуации (удельный риск) аналогична интенсивности отказов:

$$r(t) = -P'(t)/P(t) = R'(t)/[1 - R(t)]. \quad (7.41)$$

Поскольку уровень безопасности должен быть высоким, то можно принять

$$1 - R(t) = P(t) \approx 1. \quad (7.42)$$

Тогда интенсивность риска аварийной ситуации будет

$$r(t) \approx R'(t) = -P'(t); \quad R'(t) = dR/dt. \quad (7.43)$$

Поскольку время  $t$  при оценке риска аварии исчисляются в годах, то  $r(t)$  имеет смысл годового риска возникновения аварийной ситуации.

Средний годовой риск аварии:

$$r_{cp}(T) = R(t)/T. \quad (7.44)$$

Пусть, например,  $r_{cp} = \text{const} = 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;  $T = 50$  лет.

Тогда

$$R(T) = r_{cp}(T) \cdot T = 10^{-5} \cdot 50 = 5 \cdot 10^{-4}; \quad P(T) = 1 - R(T) = 1 - 5 \cdot 10^{-4} = 0,9995.$$

Такие показатели риска аварийной ситуации широко используют в гражданской авиации, а в последние годы их начали применять при нормировании безопасности оборудования атомных электростанций.

Для парка одинаковых технических объектов функция безопасности:

$$P_n(t) = P^n(t), \quad (7.45)$$

где  $n$  - численность парка одинаковых объектов.

В этом случае функция риска

$$R_n(t) = 1 - [1 - R(t)]^n \approx n \cdot R(t) \quad (7.46)$$

при условии  $nR(t) \ll 1$ .

Аналогично для удельного риска:

$$r_n(t) \approx n \cdot r(t) \quad \text{и} \quad r_{n,cp} \approx n \cdot r_{cp}(t). \quad (7.47)$$

Инженерные расчеты инженерных конструкций на безопасность основаны на концепции коэффициентов запаса.

В этом случае расчетное условие имеет вид

$$F \leq S/m, \quad (7.48)$$

где  $F$  - параметр воздействия;  $S$  - параметр сопротивления;  $m$  - коэффициент безопасности ( $m > 1$ ).

## 7.8. Показатели безопасности систем «человек – машина» (СЧМ)

Надежность характеризует безошибочность (правильность) решения стоящих перед СЧМ задач. Оценивается вероятностью правильного решения задач, которая, по статистическим данным, определяется соотношением

$$P_{пр} = 1 - \frac{m_{от}}{N}, \quad (7.49)$$

где  $m_{от}$  и  $N$  - соответственно число ошибочно решенных и общее число решаемых задач.

Точность работы оператора - степень отклонения некоторого параметра, измеряемого, устанавливаемого или регулируемого оператором, от своего истинного, заданного, или номинального значения. Количественно точность работы оператора оценивается величиной погрешности, с которой оператор измеряет, устанавливает или регулирует данный параметр:

$$\gamma = I_n - I_{оп}, \quad (7.50)$$

где  $I_n$  – истинное или номинальное значения параметра;  $I_{оп}$  – фактически измеряемое или регулируемое оператором значение этого параметра.

Не всякая погрешность является ошибкой, до тех пор, пока величина погрешности не выходит за допустимые пределы.

В работе оператора следует различать случайную и систематическую погрешности. Случайная погрешность оператора оценивается величиной среднеквадратической погрешности, систематическая погрешность – величиной математического ожидания отдельных погрешностей.

Своевременность решения задачи СЧМ оценивается вероятностью того, что стоящая перед СЧМ задача будет решена за время, не превышающее допустимое:

$$P_{св} = P \{ T_{ц} \leq T_{доп} \} = \int_0^{T_{доп}} \varphi(T) \cdot dT, \quad (7.51)$$

где  $\varphi(T)$  – функция плотности времени решения задачи системой «человек-машина».

Эта вероятность по статистическим данным

$$P_{св} = 1 - \frac{m_{нс}}{N}, \quad (7.52)$$

где  $m_{нс}$  – число несвоевременно решенных СЧМ задач.

В качестве общего показателя надежности используется вероятность правильного ( $P_{пр}$ ) и своевременного ( $P_{св}$ ) решения задачи:

$$P_{счм} = P_{пр} \cdot P_{св}. \quad (7.53)$$

Безопасность труда человека в СЧМ оценивается вероятностью безопасной работы:

$$P_{бт} = 1 - \sum_{i=1}^n P_{воз.i} \cdot P_{от.i}, \quad (7.54)$$

где  $P_{воз.i}$  – вероятность возникновения опасной или вредной для человека производственной ситуации  $i$ -го типа;  $P_{от.i}$  – вероятность неправильных действий оператора в  $i$ -й ситуации; – число возможных травмоопасных ситуаций.

Степень автоматизации СЧМ характеризует относительное количество информации, перерабатываемой автоматическими устройствами:

$$Ka = 1 - \frac{H_{оп}}{H_{счм}}, \quad (7.55)$$

где  $H_{оп}$  – количество информации, перерабатываемой оператором;  $H_{счм}$  – общее количество информации, циркулирующей в системе «человек-машина».

Экономический показатель характеризует полные затраты на систему «человек-машина». В общем случае эти затраты складываются из затрат на создание (изготовление) системы  $C_n$ , затрат на подготовку операторов  $C_{оп}$  и эксплуатационных расходов  $C_э$ :

$$W_{счм} = E_n (C_n + C_{оп}) + C_э, \quad (7.56)$$

где  $E_n$  – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных затрат ( $C_n + C_{оп}$ ).

Эргономические показатели учитывают совокупность специфических свойств СЧМ и представляют иерархическую структуру, включающую в себя ценностную эргономическую характеристику (эргономичность СЧМ), комплексные (управляемость, обслуживаемость, осваиваемость и обитаемость СЧМ), групповые (социально-психологические, психологические, физиологические, антропометрические, гигиенические) и единичные показатели.

Надежность оператора – свойство качественно выполнять трудовую деятельность в течение, определенного времени при заданных условиях.

Ошибками оператора являются: невыполнение требуемого или выполнение лишнего (несанкционированного) действия, нарушение последовательности выполнения действий, неправильное или несвоевременное выполнение требуемого действия.

В зависимости от последствий ошибки могут быть аварийными и неаварийными.

Надежность оператора характеризуется показателями безошибочности, готовности, восстанавливаемости и своевременности.

Показателем безошибочности является вероятность безошибочной работы. Для типовых, часто повторяющихся операций в качестве показателя безошибочности может использоваться интенсивность ошибок

$$P_j = \frac{N_j - n_j}{N_j}; \quad \lambda_j = \frac{n_j}{N_j \cdot T_j}, \quad (7.57)$$

где  $P_j$  – вероятность безошибочного выполнения операций  $j$ -го типа;  $\lambda_j$  – интенсивность ошибок  $j$ -го вида;  $N_j, n_j$  – общее число выполненных операций  $j$ -го вида и допущенное при этом число ошибок;  $T_j$  – среднее время выполнения операций  $j$ -го вида.

Для участка устойчивой работоспособности оператора можно найти вероятность безошибочного выполнения операций:

$$P_{оп} = \prod_{j=1}^r P_j^{k_j} = e^{-\sum_{j=1}^r (1-P_j)k_j} = e^{-\sum_{j=1}^r \lambda_j \cdot T_j \cdot k_j}, \quad (7.58)$$

где  $k_j$  – число выполненных операций  $j$ -го вида;  $r$  – число различных типов операций ( $j = 1, 2, \dots, r$ ).

Коэффициент готовности оператора представляет собой вероятность включения оператора в работу в любой произвольный момент времени:

$$K_{оп} = 1 - \frac{T_0}{T}, \quad (7.59)$$

где  $T_0$  – время, в течение которого оператор по тем или иным причинам не находится на рабочем месте;  $T$  – общее время работы оператора.

Показатель восстанавливаемости – возможность самоконтроля оператором своих действий и исправления допущенных ошибок, т.е. представляет вероятность исправления оператором допущенной ошибки:

$$P_{исп} = P_k \cdot P_{об} \cdot P_{и}, \quad (7.60)$$

где  $P_k$  – вероятность выдачи сигнала системой контроля;  $P_{об}$  – вероятность обнаружения оператором сигнала контроля;  $P_{и}$  – вероятность исправления ошибочных действий при повторном выполнении операций.

Основным показателем своевременности является вероятность выполнения задачи в течение времени  $\tau < t_{л}$ :

$$P_{св} = P\{\tau < t_{л}\} = \int_0^{t_{л}} f(\tau) \cdot d\tau, \quad (7.61)$$

где  $f(\tau)$  – функция распределения времени решения задачи оператором.

Надежность деятельности оператора не остается величиной постоянной, а меняется с течением времени. Это обусловлено как изменением условий деятельности, так и колебаниями состояния оператора.

Среднее значение вероятности безошибочной работы оператора

$$P_{оп} = \sum_{i=1}^m P_i \cdot P_{оп/i}, \quad (7.62)$$

где  $P_i$  – вероятность наступления  $i$ -го состояния СЧМ;  $P_{оп/i}$  – условная вероятность безошибочной работы оператора в  $i$ -м состоянии;  $m$  – число рассматриваемых состояний СЧМ.

Для систем непрерывного типа показателем надежности является вероятность безотказного, безошибочного и своевременного протекания производственного процесса в течение времени  $t$ :

$$P_{ч.м.1}(t) = P_T(t) + [1 - P_T(t)]K_{оп}[P_{оп} \cdot P_{св} + (1 - P_{оп})P_{исп}(t)], \quad (7.63)$$

где  $P_T(t)$  – вероятность безотказной работы технических средств;  $K_{оп}$  – коэффициент готовности оператора;  $P_{св}$  – вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий;  $P_{исп}$  – вероятность исправления ошибочных действий.

Для СЧМ дискретного типа:

$$P_{ч.м.2} = K_T \cdot P_T \cdot P_{оп} P_{св} + (1 - P_T \cdot K_T)P_{вос} \cdot P_{оп} \cdot P_{св} + (1 - P_{оп})P_T \cdot P_{исп}. \quad (7.64)$$

где  $K_T$  – коэффициент готовности техники;  $P_{вос}$  – вероятность восстановления отказавшей техники.

Вероятность  $P_{ч.м.1}$  используется в случаях:

- 1) технические средства работают исправно;
- 2) произошел отказ технических средств, но при этом:
  - а) оператор безошибочно и своевременно выполнил требуемые действия по ликвидации аварийной обстановки;
  - б) оператор допустил ошибочные действия, но своевременно их исправил.

Показатель надежности  $P_{ч.м.2}$  используется, если:

- 1) в требуемый момент времени техника находится в исправном состоянии, не отказала в течение времени выполнения задачи, действия оператора были безошибочными и своевременными;
- 2) неготовая или отказавшая техника была своевременно восстановлена, операторы при решении задачи не допускали ошибок;
- 3) при безотказной работе техники оператор допустил ошибку, но своевременно исправил ее.

## 7.9. Роль инженерной психологии в обеспечении надежности

Конструктор, разрабатывая аппараты, отвечает за обеспечение всех требуемых характеристик, включая надежность. При этом разработка конструкции, выбор формы, цвета, условий эксплуатации, оптимальных условий обслуживания, управления должны вестись с учетом человеческих возможностей и ограничений.

Роль человеческого фактора в снижении надежности очень высока. Частота отказов по вине человека колеблется от 20 до 80 %:

$$P_S(t) = P_ч(t) \cdot P_м(t), \quad (7.65)$$

где  $P_S$  – показатель надежности всей системы;  $P_ч$  – показатель надежности человека;  $P_м$  – показатель надежности машины.

Надежность человека при проектировании машины должны также учитываться, как и надежность машины. Между надежностью и инженерной психологией как областями науки существует естественная связь. Обе области связаны с прогнозированием и улучшением характеристик систем, но действуют они разными способами и средствами. Специалист по надежности изменяет конструкцию, материал, схему, снижает нагрузки. Специалист по инженерной психологии воздействует на те технические факторы, которые оказывают влияние на возможности оператора: уровень шума, освещенность, уровень воздействия окружающей среды и т.д.

Функционирование технической системы и человека принципиально различно. Человек более сложная система, чем любая машина, и взаимосвязь психофизиологических факторов недостаточно изучена, нежели механизмов. Человеку внутренне свойственна меньшая стабильность чем машине, на его работу оказывает влияние большее число факторов.

Надежность оператора может быть рассчитана как элемент технической системы путем использования входных и выходных параметров. Поведение человека можно характеризовать комбинацией трех параметров: входного сигнала ( $S$ ), внутренней реакции ( $R$ ), отклика на выходе ( $O$ ).

Упрощенную математическую модель поведения человека представим в следующем виде:

$$S \rightarrow R \rightarrow O \rightarrow E \quad (7.66)$$


где  $S$  – изменение окружающих условий, воспринимаемых оператором (например, загорание сигнальной лампы);  $R$  – восприятие и обработка физического сигнала (запоминание, обдумывание и т.д.);  $O$  – действие, обусловленное внутренней реакцией человека на сигнал (например, речь, нажатие кнопки);  $E$  – изменение в машине (системе), вызванное действием оператора

Сложность заключается в том, что поведение человека определяется действием многих цепей  $S \rightarrow R \rightarrow O$ , переплетенных между собой. Человек допускает ошибку, когда какой-либо элемент цепи оказывается неисправным. Например:

- физические изменения окружающих условий не воспринимаются как сигнал  $S$ ;
- сигналы неразличимы;
- сигнал принят, но неправильно понят;
- сигнал принят, понят, но правильный отклик неизвестен оператору;
- правильный отклик находится, за пределами возможностей человека;
- отклик выполняется неправильно, не в требуемой последовательности.

Применительно к конструированию аппаратуры это означает следующее: чтобы оператор был в состоянии откликнуться соответствующим образом, сигналы должны восприниматься оператором и требовать отклика, который оператор способен произвести. Характеристики аппаратуры должны быть приспособлены к возможностям оператора, должны учитывать ограничения, налагаемые ростом человека, его весом, временем реакции на сигнал. Для четкой работы системы, оператор должен получить подтверждение о последствиях отклика по каналам обратной связи. Не имея возможности видеть результаты своей деятельности, оператор не может быть уверен в их правильности, его реакция будет характеризоваться большой изменчивостью.

Для конструктора это означает, что аппаратура должна обеспечивать оператора входными сигналами, и сигналами, передаваемыми по каналу обратной связи. Конструктор должен предусмотреть средствами для ввода информации оператору без перегрузки каналов его восприятия. Задачи автоматизации надо решать на основе анализа распределения функций между человеком и машиной.

Вопрос, выбрать ли автоматический вариант, использовать оператора или выбрать промежуточный вариант, решается на основе сравнения характеристик надежности машины и оператора. Однозначного решения нет.

Наличие оператора желательно, если в процессе могут произойти неожиданные события, т.к. только человек обладает гибкостью необходимой для принятия необходимого решения, связанное с неожиданными событиями.

На этапе проектирования производится оценка надежности человека, машины и системы человек-машина в целом. В качестве руководства при выборе конкретного типа органа управления индикаторов и т.д. используются опытные данные по надежности. Каждый орган



управления и индикатор имеет конечное число (см. табл. 6.1) размерных параметров, каждый из которых связан с оценкой надежности. Различный набор параметров гарантирует разную надежность работы человека. Необходимо учитывать, что надежность устного распоряжения или выполнения записи равна 0,9998. Надежность мыслительных операций (принятия решения) равна 0,999.

**Пример 7.4.** Сконструировать ручку управления, обеспечивающую вероятность безотказной эксплуатации  $P_3(t) = 0,994$ . Исходные данные приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Исходные данные к примеру 6.3

Параметр	Значение	$P(t)$
Длина ручки	152...128	0,9963
Величина перемещения ручки	30...40	0,9975
Соппротивление управлению	2,3...4 кг	0,9999

Вероятность безотказной эксплуатации ручки управления равна

$$P_3(t) = 0,9963 \cdot 0,9975 \cdot 0,999 = 0,9937.$$

Используя опытные данные по надежности работы человека, можно проигнорировать вероятность колебания ошибок человека при выполнении контрольного задания.

**Пример 7.5.** Рассчитать надежность операции нажатия на кнопку операторов при загорании зеленой лампочки. Исходные данные приведены в табл. 7.4. Расчленим операции на элементы:  $S$  – зажигание лампы,  $R$  – обдумывание,  $O$  – нажатие кнопки.

Таблица 7.4

Исходные данные к примеру 7.5

№п.п.	Кнопка	$P(t)$	Лампочка	$P(t)$
1	Диаметр кнопки (миниатюрная)	0,9995	Диаметр лампочки 6,4-12,7	0,9997
2	Один ряд	0,9997	Количество лампочек 3-4	0,9975
3	Расстояние между кнопками 10-13 мм	0,9993	Индикация непрерывная	0,9996
4	Отсутствие фиксации	0,9998		

$$P_O = 0,9995 \cdot 0,9997 \cdot 0,9993 \cdot 0,9998 = 0,9983;$$

$$P_S = 0,9997 \cdot 0,9975 \cdot 0,9996 = 0,9968.$$

Вероятность нажатия на кнопку оператором определится из выражения:

$$P_4(t) = P_S(t) \cdot P_R(t) \cdot P_O(t) = 0,9968 \cdot 0,999 \cdot 0,9983 \approx 0,9941.$$

## 8. Логико-графические методы анализа надежности и риска

Анализ причин промышленных аварий показывает, что возникновение и развитие крупных аварий, как правило, характеризуется комбинацией случайных локальных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях аварии (отказы оборудования, человеческие ошибки при эксплуатации/ проектировании, внешние воздействия, разрушение/ разгерметизация, выброс/ утечка, пролив вещества, испарение, рассеяние веществ, воспла-

менение, взрыв, интоксикация и т.д.). Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы деревьев отказов и событий.

Модели процессов в человеко-машинных системах должны отражать процесс появления отдельных предпосылок и развития их в причинную цепь происшествий в виде соответствующих диаграмм причинно-следственных связей – диаграмм влияния. Такие диаграммы являются формализованными представлениями моделируемых объектов, процессов, целей, свойств в виде множества графических символов (узлов, вершин) и отношений – предполагаемых или реальных связей между ними. Широкое распространение получили диаграммы в форме *поточковых графов* (графов состояний и переходов), *деревьев событий* (целей, свойств) и *функциональных сетей* различного предназначения и структуры.

В последние десятилетия интенсивно разрабатываются диаграммы влияния из класса семантических или функциональных *сетей*, которые являются графами, но с дополнительной информацией, содержащихся в их узлах и дугах (ребрах). Достоинства таких сетей – возможность объединения логических и графических способов представления исследуемых процессов, учет стохастичности информации, выраженной узлами и дугами, доступность для моделирования циклических и многократно наблюдаемых событий, наибольшие (по сравнению с другими типами диаграмм) логические возможности.

Другим (после графов) и наиболее широко используемым типом диаграмм влияния являются «деревья». В безопасности диаграммы данного класса часто называют «деревом происшествий» и «деревом их исходов». Они являются в сущности графами с ветвящейся структурой и с дополнительными (логическими) условиями.

Основные достоинства этих моделей: сравнительная простота построения; дедуктивный характер выявления причинно-следственных связей исследуемых явлений; направленность на их существенные факторы; легкость преобразования таких моделей; наглядность реакции изучаемой системы на изменение структуры; декомпозируемость «дерева» и процесса его изучения; возможность качественного анализа исследуемых процессов; легкость дальнейшей формализации и алгоритмизации; приспособленность к обработке на средствах ВТ; доступность для статистического моделирования и количественной оценки изучаемых явлений, процессов и их свойств.

Создание дерева заключается в определении его структуры: а) элементов – головного события (происшествия) и ему предшествующих предпосылок; б) связей между ними – логических условий, соблюдение которых необходимо и достаточно для его возникновения.

На практике обычно используют обратную или прямую *последовательность* выявления условий возникновения конкретных происшествий или аварийности и травматизма в целом: а) от головного события *дедуктивно* к отдельным предпосылкам, либо б) от отдельных предпосылок *индуктивно* к головному событию.

Из анализа структуры диаграммы влияния следует, что основными ее компонентами служат *узлы* (вершины) и *связи* (отношения) между ними. В качестве узлов обычно подразумеваются простейшие элементы моделируемых категорий (переменные или константы) – события, состояния, свойства, а в качестве связей – активности, работы, ресурсы и другие

взаимодействия. Отношения или связи между переменными или константами в узлах диаграммы графически представляются в виде линий, называемых дугами или ребрами.

Каждые два соединенных между собой узла образуют ветвь диаграммы. В тех случаях, когда узлы связаны направленными дугами таким образом, что каждый из них является общим ровно для двух ветвей, возникают *циклы* или *петли*.

Переменные в узлах характеризуются *фреймами* данных – множеством выходов (значений, принимаемых переменными, неизменных во времени и между собой не пересекающихся) и условными распределениями вероятностей появления каждого из них.

Идея прогнозирования размеров ущерба от происшествий в человеко-машинных системах основана на использовании деревьев специального типа (*деревьев исходов*) – вероятностных графов. Их построение позволяет учитывать различные варианты разрушительного воздействия потоков энергии или вредного вещества, высвободившихся в результате происшествия.

С помощью предварительно построенных диаграмм – графов, сетей, и деревьев могут быть получены математические модели аварийности и травматизма.

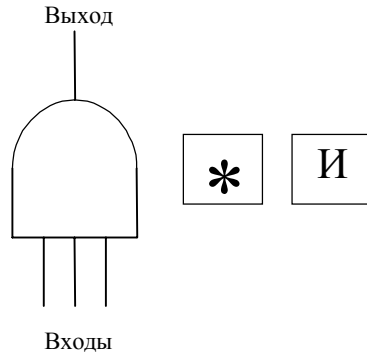
В исследовании безопасности широкое распространение получили диаграммы влияния ветвящейся структуры, называемые «деревом» событий (отказов, происшествий). *Деревом* событий называют не ориентированный граф, не имеющий циклов, являющийся конечным и связным. В нем каждая пара вершин должна быть связанной (соединенной цепью), однако все соединения не должны образовывать петель (циклов), т.е. содержать такие маршруты, вершины которых одновременно являются началом одних и концом других цепей.

Структура *дерева происшествий* обычно включает одно, размещаемое сверху нежелательное событие – происшествие (авария, несчастный случай, катастрофа), которое соединяется с набором соответствующих событий – предпосылок (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих определенные их цепи или «ветви». «Листьями» на ветвях дерева происшествий служат предпосылки – инициаторы причинных цепей, рассматриваемые как постулируемые исходные события, дальнейшая детализация которых не целесообразна. В качестве узлов дерева происшествий могут использоваться как отдельные события или состояния, так и логические условия их объединения (сложения или перемножения).

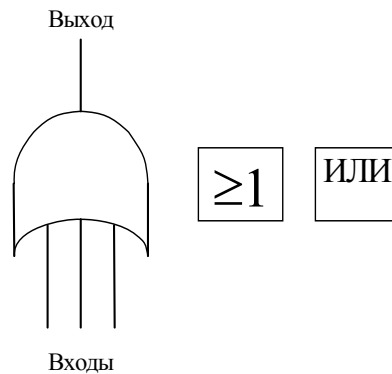
## 8.1. Определения и символы, используемые при построении дерева

*Схема И* (схема совпадения): сигнал на выходе появляется только тогда, когда поступают все входные сигналы; для изображения используются символы

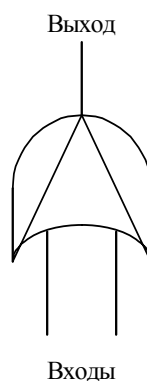
*Схема ИЛИ* (схема объединения): сигнал на выходе появляется при поступлении на



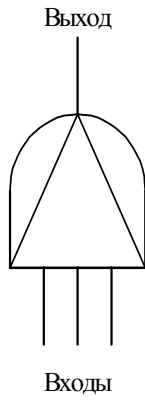
вход любого одного или большего числа сигналов; для изображения используются символы



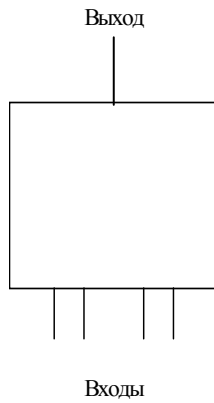
*Схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ*: сигнал на выходе рассматривается как промежуточное событие и появляется при поступлении на вход одного и только одного сигнала; для изображения используется символ



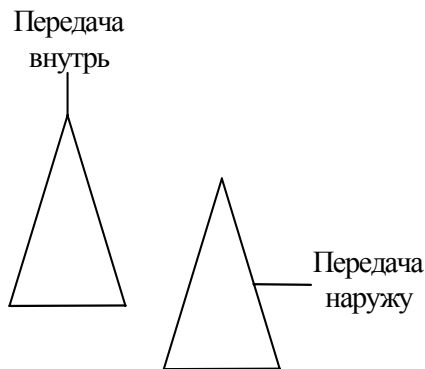
*Схема И с приоритетом*: логически эквивалентна схеме *И*, но входные сигналы должны поступать в определенном порядке; для изображения используется символ



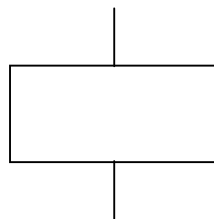
*Специальная схема:* отображает любую другую разрешенную комбинацию входных сигналов; для изображения используется символ



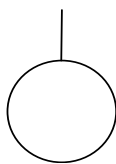
*Вход* или *выход* изображаются с помощью треугольников, что позволяет избежать повторения отдельных участков дерева. Прямая, входящая в вершину треугольника, означает переход внутрь соответствующей ветви, а прямая, берущая начало из середины боковой стороны треугольника, - переход к другой ветви.



*Результирующее событие:* наступает в результате конкретной комбинации неисправностей на входе логической схемы; изображается в виде прямоугольника



*Событие, означающее первичный отказ (или неисправность элемента):* изображается в виде кружка



*Неполное событие:* неисправность, причины которой выявлены не полностью. Такое событие может быть детализировано путем показа вызывающих его первичных неисправностей, и если этого не делается, то, значит, либо отсутствует необходимая информация, либо само событие не представляет особого интереса. Для изображения используется символ



## 8.2. Процедура анализа дерева отказов

Опасности носят потенциальный, т.е. скрытый характер. Условия реализации потенциальной опасности называются причинами.

Опасность – следствие некоторой причины или группы причин, которая, в свою очередь, является следствием другой причины, т.е. причины и следствия образуют иерархические структуры или системы, так называемые: «дерево событий», «дерево причин», «дерево отказа» или «дерево опасности», «дерево неисправностей».

Процедура построения дерева неисправностей (отказов) включает, как правило, следующие этапы:

1. Определение нежелательного (завершающего) события в рассматриваемой системе.
2. Тщательное изучение возможного поведения и предполагаемого режима использования системы.
3. Определение функциональных свойств событий более высокого уровня для выявления причин тех или иных неисправностей системы и проведение более глубокого анализа поведения системы с целью выявления логической взаимосвязи событий более низкого уровня, способных привести к отказу системы.
4. Построение дерева неисправностей (отказов) для логически связанных событий на входе. Эти события должны определяться в терминах идентифицируемых независимых первичных отказов. Чтобы получить количественные результаты для завершающего нежелательного события дерева, необходимо задать вероятность отказа, коэффициент неготовности, интенсивность отказов, интенсивность восстановлений и другие показатели, характеризующие первичные события, при условии, что события дерева неисправностей не являются избыточными.

Более строгий и систематический анализ предусматривает выполнение таких процедур, как (1) определение границ системы, (2) построение дерева неисправностей, (3) качественная оценка, (4) количественная оценка.

Обычно система изображается в виде блок-схемы, показывающей все функциональные взаимосвязи и элементы. При построении дерева неисправностей исключительно важную роль приобретает правильное задание граничных условий, которые не следует путать с физическими границами системы.

Одним из основных требований, предъявляемых к граничным условиям, является задание завершающего нежелательного события, установление которого требует особой тщательности, поскольку именно для него как для основного отказа системы строится дерево неисправностей. Кроме того, чтобы проводимый анализ был понятен всем заинтересованным лицам, исследователь обязан составить перечень всех допущений, принимаемых при определении системы и построении дерева неисправностей.

Анализ дерева происшествий связан с определением возможности появления или не появления головного события – происшествия конкретного типа. Данные условия устанавливаются путем выделения из всего массива исходных предпосылок двух подмножеств, реализация которых либо приводит, либо не приводит к возникновению головного события. Такие подмножества делятся на *аварийные сочетания* предпосылок, образующие в совокупности с условиями их появления каналы прохождения сигнала до этого события, и *отсечные сочетания*, исключающие условия формирования таких путей к головному событию. Самым удобным способом выявления условий возникновения и предупреждения происшествий является выделение из таких подмножеств так называемых «*минимальных сочетаний событий*», т.е. тех из них, появление которых минимально необходимо и достаточно для достижения желаемого результата.

### 8.3. Построение дерева отказов

Дерево отказов - это 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. Таким образом, дерево отказов - это ориентировочный граф в виде дерева.

Основной целью построения дерева неисправностей является символическое представление существующих в системе условий, способных вызвать ее отказ. Кроме того, построенное дерево позволяет показать в явном виде слабые места системы и является наглядным средством представления и обоснования принимаемых решений, а также средством исследования компромиссных соотношений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям.

Выделяют пять типов вершин дерева отказов (ДО):

- вершины, отображающие первичные отказы;
- вершины, отображающие результирующие или вторичные отказы;
- вершины, отображающие локальные отказы, которые не влияют на возникновение других отказов;
- вершины, соответствующие операции логического объединения случайных событий (типа "ИЛИ");
- вершины, соответствующие операции логического произведения случайных событий (типа "И").

Каждой вершине ДО, отображающей первичный или результирующий отказ, соответствует определенная вероятность возникновения отказа. Одним из основных преимуществ ДО является то, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов систем и собы-

тий, которые приводят к постулируемому отказу или аварии. Чтобы определить вероятность отказа, необходимо найти аварийные сочетания, для чего необходимо произвести качественный и количественный анализ дерева отказов.

Структура «дерева отказа» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в узлах «деревьев» используются знаки «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

Обычно предполагается, что исследователь, прежде чем приступить к построению дерева неисправностей, тщательно изучает систему. Поэтому описание системы должно быть частью документации, составленной в ходе такого изучения.

В зависимости от конкретных целей анализа дерева неисправностей для построения последнего специалисты по надежности обычно используют либо метод первичных отказов, либо метод вторичных отказов, либо метод инициированных отказов.

**Метод первичных, отказов.** Отказ элемента называется *первичным*, если он происходит в расчетных условиях функционирования системы. Построение дерева неисправностей на основе учета лишь первичных отказов не представляет большой сложности, так как дерево строится только до той точки, где идентифицируемые первичные отказы элементов вызывают отказ системы. Для иллюстрации этого метода рассмотрим следующий пример.

**Пример 8.1.** Требуется построить дерево неисправностей для простой системы — комнаты, в которой имеются выключатель и электрическая лампочка. Считается, что отказ выключателя состоит лишь в том, что он не замыкается, а завершающим событием является отсутствие освещения в комнате.

Дерево неисправностей для этой системы показано на рис 8.1. Основными, или первичными, событиями дерева неисправностей являются (1) отказ источника питания  $E_1$ , (2) отказ предохранителя  $E_2$ , (3) отказ выключателя  $E_3$  и (4) перегорание лампочки  $E_4$ .

Промежуточным событием является прекращение подачи электроэнергии. Наибольший интерес представляет завершающее событие - «отсутствие света в комнате», и поэтому именно ему уделяется основное внимание при анализе. Дерево неисправностей, изображенное на рис. 8.1, показывает, что исходные события представляют собой входы схем ИЛИ: при наступлении любого из четырех первичных событий  $E_1, E_2, E_3, E_4$  осуществляется завершающее событие (отсутствие света в комнате).



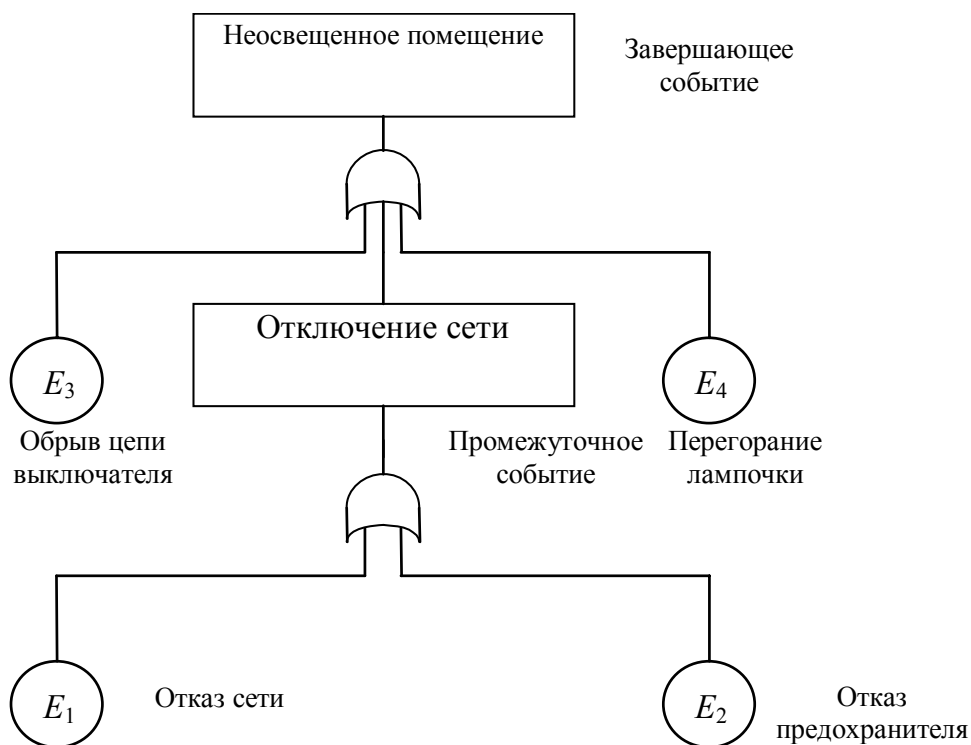
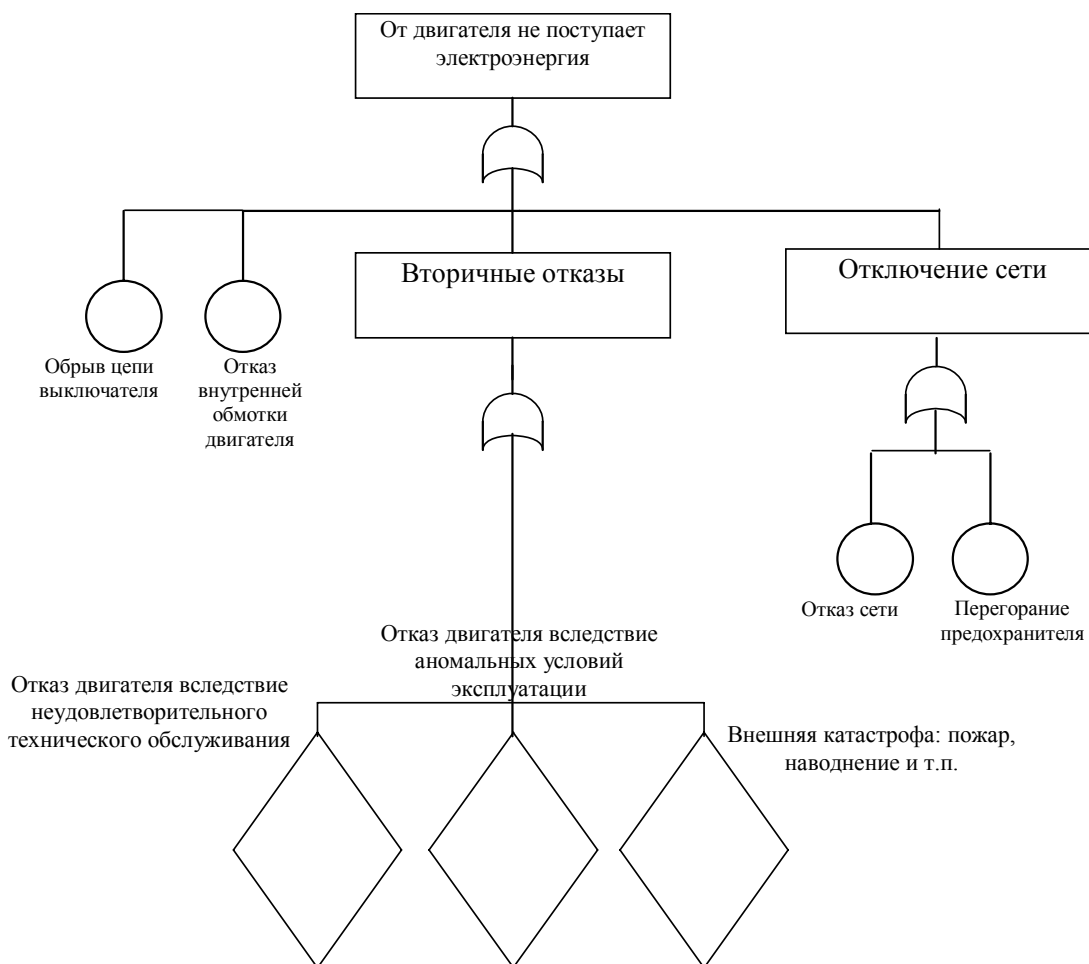


Рис. 8.1. Дерево неисправностей для случая первичных отказов.

**Метод вторичных отказов.** Чтобы анализ охватывал и вторичные отказы, требуется более глубокое исследование системы. При этом анализ выходит за рамки рассмотрения системы на уровне отказов ее основных элементов, поскольку вторичные отказы вызываются неблагоприятным воздействием окружающих условий или чрезмерными нагрузками на элементы системы в процессе эксплуатации.

**Пример 8.2.** На рис 8.2 показано простое дерево неисправностей с завершающим событием «прекращение выработки электроэнергии генератором». Дерево отказов отображает такие первичные события, как отказ выключателя (отсутствие замыкания), неисправности внутренних цепей двигателя, источника питания и предохранителя. Вторичные отказы изображаются прямоугольником как промежуточное событие.

Вторичные отказы, изображенные на рис. 8.2, происходят вследствие неудовлетворительного технического обслуживания, неблагоприятного воздействия внешней среды, стихийного бедствия и т. д.



8.2. Дерево неисправностей для случая вторичных отказов.

**Метод иницированных отказов.** Подобные отказы возникают при правильном использовании элемента, но в неустановленное время или в неполюженном месте. Другими словами, иницированные отказы - это сбои операций координации событий на различных уровнях дерева неисправностей: от первичных отказов до завершающего события (нежелательного либо конечного).

**Пример 8.3.** Типичным примером иницированного отказа является поступление ошибочного сигнала на какое-либо электротехническое устройство (например, двигатель или преобразователь). Взаимосвязь между основными и иницированными отказами показана на рис. 8.3.

Многообразие причин аварийности и травматизма наиболее полно и удобно представляется в виде диаграммы-дерева причин, отражающей процесс появления и развития цепи предпосылок. Основными компонентами диаграммы причин или опасностей являются узлы (или вершины) и взаимосвязи между ними. В качестве узлов подразумеваются события, свойства и состояния элементов рассматриваемой системы, а также логические условия их трансформации (сложение «ИЛИ» и перемножение «И»).

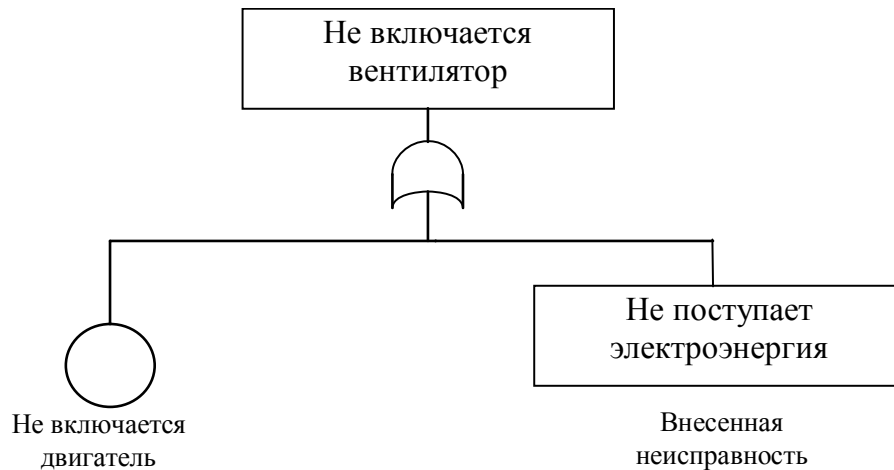


Рис. 8.3. Дерево неисправностей для случая основных и инициированных отказов.

Операция «И» означает, что перед тем, как произойдет некоторое событие «А», должно произойти несколько событий, например, «Б» и «В».

В вероятностном аспекте такая операция выражается логическим произведением:

$$P(A) = P(B) * P(V).$$

Операция «ИЛИ» означает, что некоторое событие «Г» будет иметь место, если произойдет хотя бы одно из нескольких событий или все события, например, «Д» и «Е».

В этом случае вероятность появления события «Г» будет иметь вид алгебраической суммы:

$$P(\Gamma) = P(D) + P(E) - P(D) * P(E).$$

**Пример 8.4.** Гибель человека от электрического тока может произойти при включении его тела в электрическую цепь с достаточной для этого силой тока. Следовательно, чтобы произошел несчастный случай (головное событие «А»), необходимо одновременное существование трех условий (рис. 8.4).

Условие «Б» – наличие потенциально высокого напряжения на корпусе электрической установки.

Событие «В» означает появление человека на токопроводящем основании, соединенном с землей.

Событие «Г» - касание телом человека корпуса электроустановки.

В свою очередь, событие «Б» может быть следствием любого из двух событий – предпосылок «Д» и «Е», где «Д» – понижение сопротивления изоляции токоведущих частей, а событие «Е» – касание ими корпуса установки.

Событие «В» также обуславливается двумя предпосылками: «Ж» – вступление человека на токопроводящее основание и «З» – касание его туловищем заземленных элементов помещения.

Событие «Г» является результатом появления одной из трех предпосылок: «И» – потребность ремонта, «К» – потребность техобслуживания и «Л» – использование электроустановки по назначению, или нормальная эксплуатация установки.

Анализ дерева опасности состоит в выявлении условий, минимально необходимых и достаточных для возникновения или невозникновения головного события «А». Аналитически выражение условия реализации данного несчастного случая имеет вид:

$$P(A) = P(B) * P(V) * P(\Gamma) = [P(D) + P(E)] * [P(\text{Ж}) + P(\text{З})] * [P(\text{И}) + P(\text{К}) + P(\text{Л})].$$

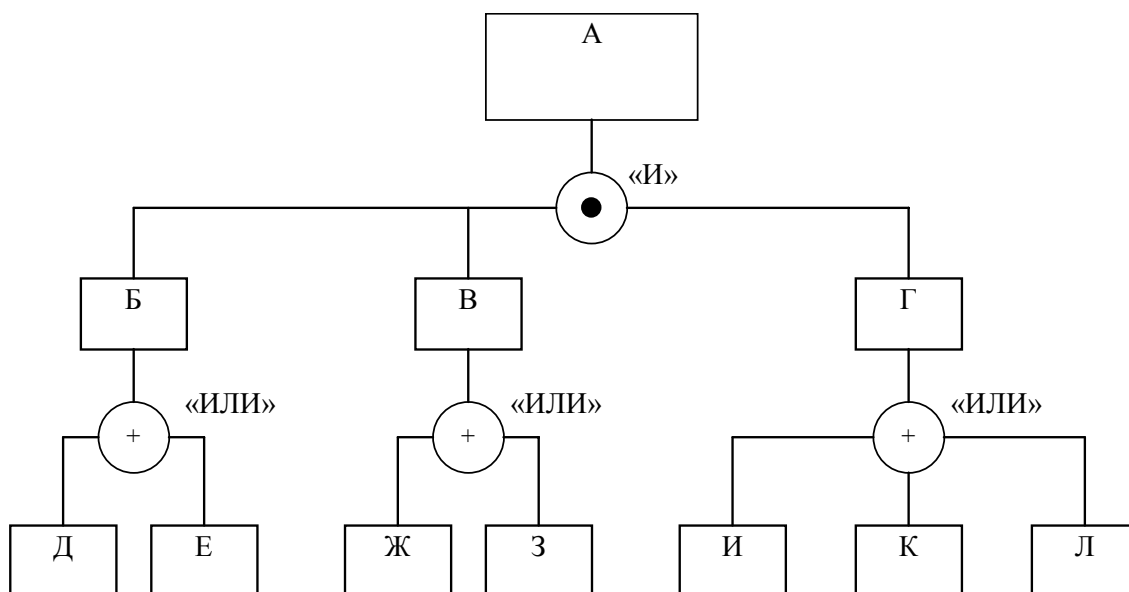


Рис.8.4. Дерево причин поражения человека электрическим током

**Пример 8.5.** Во дворе предприятия водитель тягача приступил к сцепке тягача с прицепом. Операция осложнилась из-за различной высоты тягача и прицепа, и водитель спустился вниз, чтобы выяснить причину, забыв поставить тягач на тормоз. Когда водитель находился между прицепом и тягачом, тягач с работающим двигателем скатился назад по небольшому уклону и придавил водителя к раме прицепа.

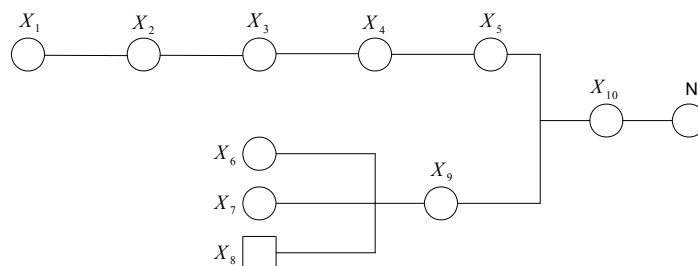


Рис. 8.5. Дерево причин аварии тягача:

$X_1$  - обычно используемый тягач вышел из строя;  $X_2$  - другой тягач использовался в работе;  $X_3$  - различие в высоте прицепа и нового тягача;  $X_4$  - осуществление сцепки затруднено;  $X_5$  - водитель встает между тягачом и прицепом;  $X_6$  - не включен ручной тормоз;  $X_7$  - вибрации от работающего двигателя;  $X_8$  - двор имеет уклон;  $X_9$  - тягач движется к прицепу;  $X_{10}$  - водитель зажимается между прицепом и тягачом;  $N$  - несчастный случай (травма); ( $X_8$  - факт постоянного характера; остальные случайного).

Анализ происшествия состоит в выяснении причин несчастного случая, выявлении источников опасности и выработке предупредительных мероприятий. Результаты анализа приведены в таблице 8.1.

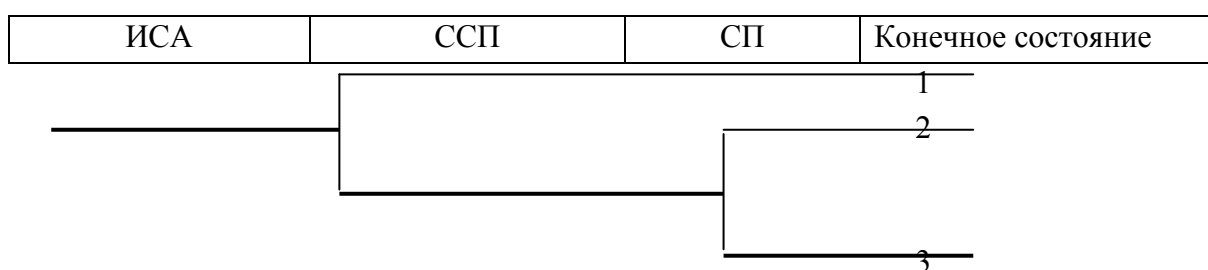
Таблица 8.1

*Результаты анализа происшествия*

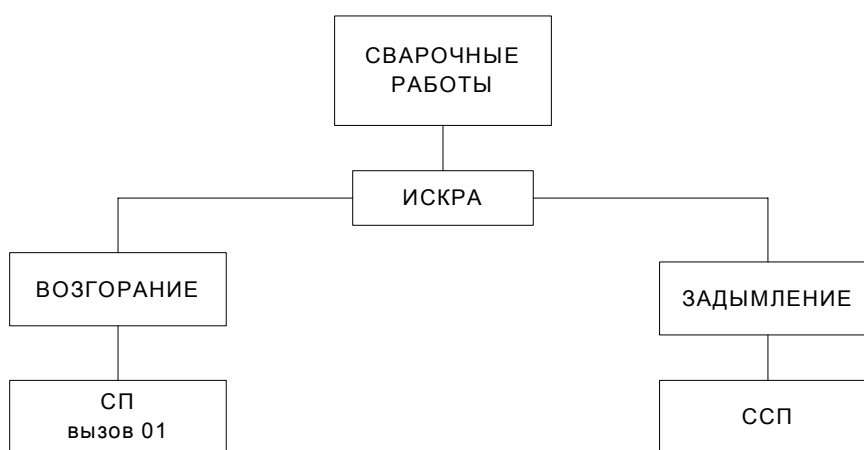
Причины несчастного случая	Источники опасности	Предупредительные мероприятия
Двор с уклоном	Неподходящие места сто-	Реконструкция двора

	янки	
Тягач, вышедший из строя	Поломка оборудования	Предупредительный ремонт транспортных средств
Разная высота прицепа и тягача	Техническая несовместимость оборудования	Стандартизация соединения оборудования
Неустановленный тормоз, работающий двигатель	Недостаточная подготовка персонала	Инструктаж водителей

**Пример 8.6.** При построении «дерева событий» для определения безопасности выполнения сварочных работ исходное событие аварии (ИСА) – искра, вызывающая возгорание. В случае возникновения задымления в помещении автоматически срабатывает спринклерная система пожаротушения (ССП). При большом очаге пожара необходимо в соответствии с инструкцией включить систему пожаротушения (СП) и вызвать пожарных. Возможное «дерево событий» представлено на рис.8.6, где «ступенька» вверх означает срабатывание соответствующей системы, а «ступенька» вниз – ее отказ.



а)



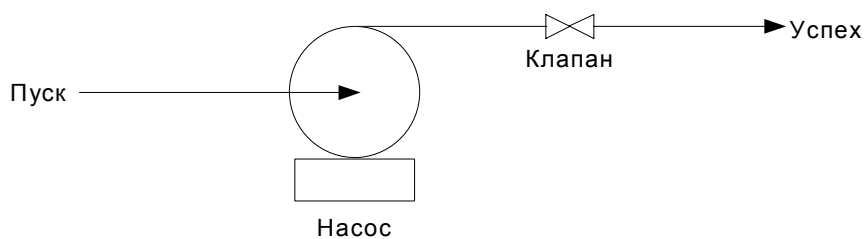
б)

Рис.8.6. Дерево событий при выполнении сварочных работ:  
а) – принципиальная схема; б) – диаграмма событий

Анализ конечных условий показывает, что состояние под номером 3, связано с тяжелыми последствиями, поэтому путь, приводящий к конечному состоянию 3, является аварийным. Если известны вероятность наступления ИСА и вероятность отказов ССП и СП, то с помощью методов теории вероятностей можно рассчитать риск пожара с тяжелыми последствиями.

Постулируя очередное ИСА, аналогичным образом строится соответствующее «дерево событий», определяются возможные аварийные цепочки и вычисляется вероятность их реализации. В окончательном виде величина риска  $R = \sum r_i$ , где  $r_i$  – вероятность реализации  $i$ -й аварийной цепочки.

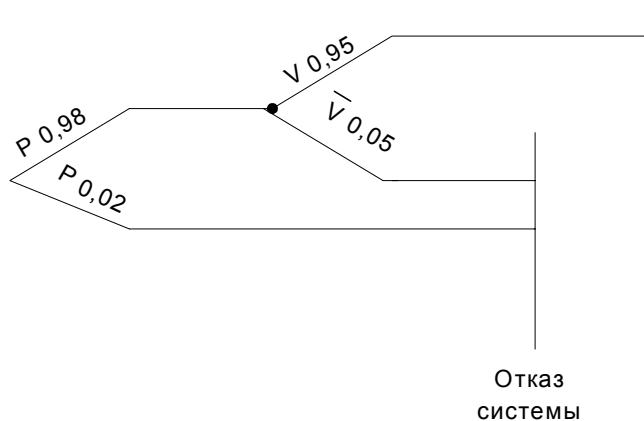
**Пример 8.7.** На рис.8.7. показана система последовательно соединенных элементов, которая включает насос и клапан, имеющие соответственно вероятности безотказной работы 0,98 и 0,95, а также приведено дерево решений для этой системы. Согласно принятому правилу верхняя ветвь соответствует желательному варианту работы системы, а нижняя - нежелательному. Дерево решений читается слева направо. Если насос не работает, система отказывает независимо от состояния клапана. Если насос работает, с помощью второй узловой точки изучается ситуация, работает ли клапан.



a)

Насос (P)

Клапан (V)



б)

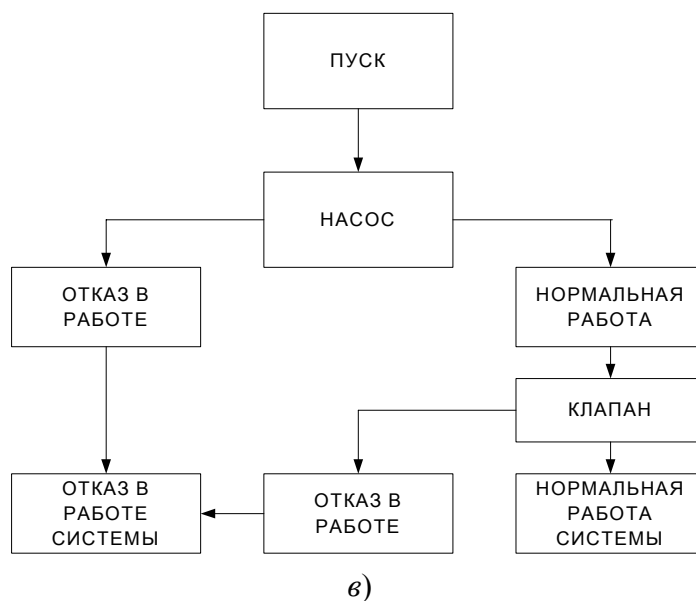


Рис.8.7. Дерево решений для двухэлементной схемы (работа насоса):  
 а) – принципиальная схема; б) – дерево решений; в) - диаграмма решений.

Вероятность безотказной работы системы  $0,98 \times 0,95 = 0.931$ . Вероятность отказа  $0.98 \times 0.05 + 0.02 = 0,069$ , и суммарная вероятность двух состояний системы равна единице.

Этот результат можно получить другим способом с помощью таблицы истинности (табл.8.2).

Таблица 8.2

Таблица истинности

Состояние насоса	Состояние клапана	Вероятность работоспособного состояния системы	Вероятность отказа системы
Работает	Работает	$0,98 \times 0,95$	-
Отказ	Работает	-	$0,02 \times 0,95$
Работает	Отказ	-	$0,98 \times 0,05$
Отказ	Отказ	-	$0,02 \times 0,05$
Суммарная величина		0,931	0,069

Методы анализа деревьев – наиболее трудоемки, они применяются для анализа проектов или модернизации сложных технических систем и производств и требуют высокой квалификации исполнителей.

## 8.4. Качественная и количественная оценка дерева отказов

Излагаемый ниже подход основан на использовании так называемых минимальных сечений дерева неисправностей.

Сечение определяется как множество элементарных событий, приводящих к нежелательному исходу. Если из множества событий, принадлежащих некоторому сечению, нельзя исключить не одного и в то же время это множество событий приводит к нежелательному исходу, то в этом случае говорят о наличии *минимального сечения*. Выявление минимальных сечений требует больших затрат времени, и для их нахождения требуется машинный алгоритм. Пример качественной оценки дерева неисправностей представлен на рис. 8.8.

Количественная оценка производится на основании информации о таких количественных показателях надежности для завершающего события, как вероятность отказа, интенсивность отказов или интенсивность восстановлений. Вначале вычисляют показатели надежности элемента, затем находят критический путь и, наконец, оценивают завершающее событие.

Количественная оценка дерева осуществляется либо статического моделирования, либо аналитическим методом.

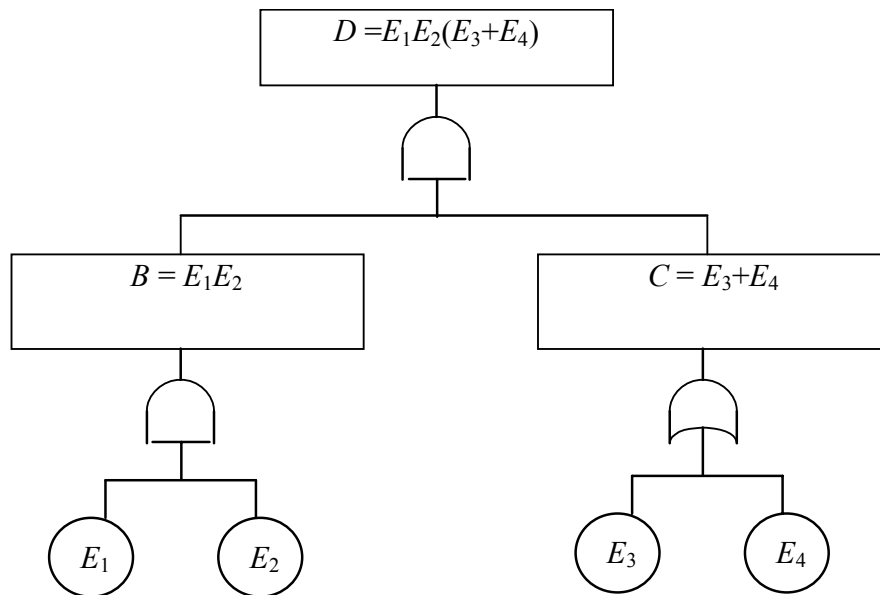


Рис. 8.8. Дерево неисправностей для гипотетического случая.

*Примечание.* Промежуточный отказ  $B$  может появиться только в том случае, когда имеют место оба события  $E_1$  и  $E_2$ . Что касается промежуточного события  $C$ , то оно может произойти только при появлении события  $E_3$  или  $E_4$ . Завершающее событие наступает только при появлении одновременно промежуточных событий  $B$  и  $C$ .

В первом случае дерево неисправностей моделируется на ЭВМ обычно для нескольких тысяч или даже миллионов циклов функционирования системы. При этом основными этапами моделирования являются:

- задание показателей надежности для элементарных событий;
- представление всего дерева неисправностей на цифровой ЭВМ;
- составление перечня отказов, приводящих к завершающему событию, и перечня соответствующих минимальных сечений;
- вычисление требуемых конечных результатов.

Во втором случае используют существующие аналитические методы.



### 8.5. Аналитический вывод для простых схем дерева отказов

Для того чтобы дерево неисправностей отвечало своему назначению в нем используются схемы, показывающие логические связи между отказами основных элементов системы и завершающим событием. Для представления этих логических схем в математической форме применяются основные законы булевой алгебры.

Схема *ИЛИ* изображается символом  $\cup$  или «+». Любой из этих символов показывает объединение событий, связанных со схемой *ИЛИ*. Математическое описание схем *ИЛИ* с двумя событиями на входе дано на рис. 8.9.

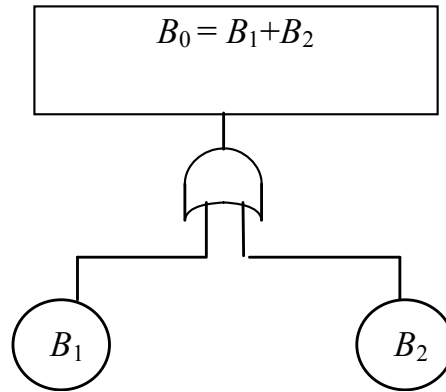


Рис.8.9. Схема *ИЛИ* с двумя входами.

Событие  $B_0$  на выходе схемы *ИЛИ* записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 + B_2,$$

где  $B_1$  и  $B_2$  — события на входе.

Схема *И* изображается символом  $*$  или  $\cap$ . Этот символ обозначает пересечение событий. Схема *И* с двумя входами показана на рис.8.10. Событие  $B_0$  на выходе схемы *И* записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 \cdot B_2.$$

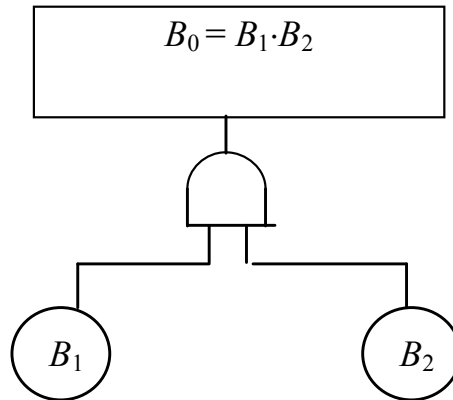


Рис.8.10. Схема И с двумя входами.

Схема И с приоритетом логически эквивалентна схеме И, но отличается от нее тем, что события на ее входе должны происходить в определенном порядке. Схема И с приоритетом, имеющая два входа, показана на рис. 8.11. В данном случае предполагается, что событие  $A_1$  должно наступить раньше события  $A_2$ .

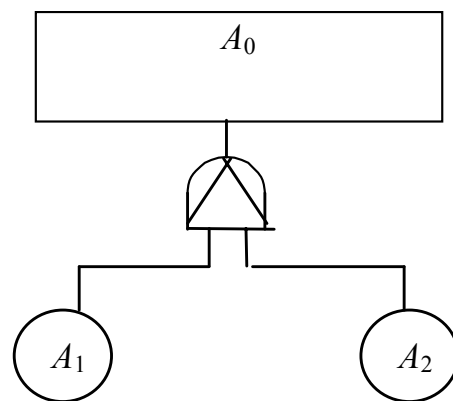


Рис. 8.11. Приоритетная схема И с двумя входами.

### 8.6. Дерево с повторяющимися событиями

Характерная конфигурация такого дерева неисправностей показана на рис. 8.12.

В этом случае дерево неисправностей можно представить с помощью следующих булевых выражений:

$$T = C \cdot B_0, \quad B_1 = A_1 + A_2, \quad (8.1)$$

$$B_0 = B_1 \cdot B_2, \quad B_2 = A_1 + A_3, \quad (8.2)$$

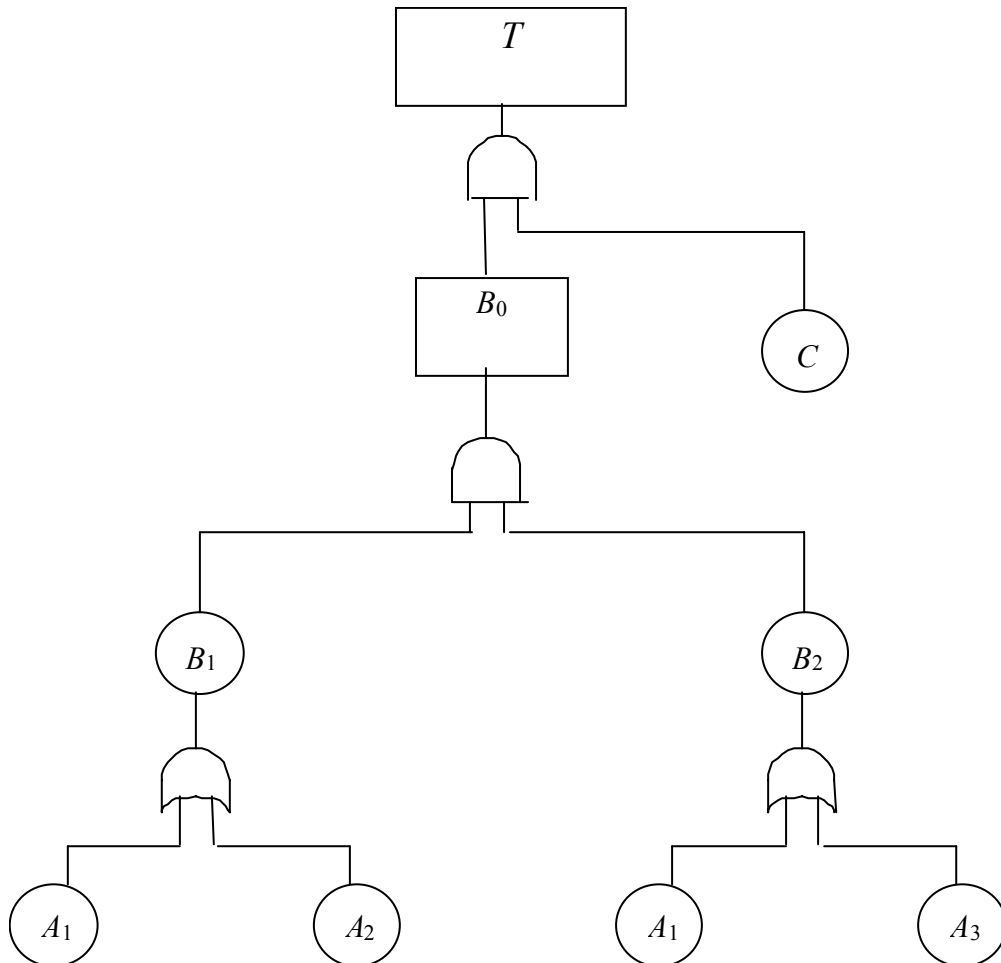


Рис. 8.12. Дерево отказов в случае повторяющихся событий:  
 $A_1, A_2, A_3$  и  $C$  - элементарные события;  $B_1, B_2, B_0$  - промежуточные события;  $T$  - завершающее событие.

Подставляя в первое выражение соотношения для  $B_0, B_1$  и  $B_2$ , получаем

$$T = C (A_1 + A_2) (A_1 + A_3). \quad (8.3)$$

Согласно рис. 8.12, отказ  $A_1$  является повторяющимся элементарным событием, поэтому полученное выражение необходимо упростить, используя распределительный закон булевой алгебры.

В результате получаем

$$T = C [A_1 + A_2 \cdot A_3], \quad (8.4)$$

и первоначальное дерево неисправностей (рис.8.12) принимает вид, показанный на рис.8.13.

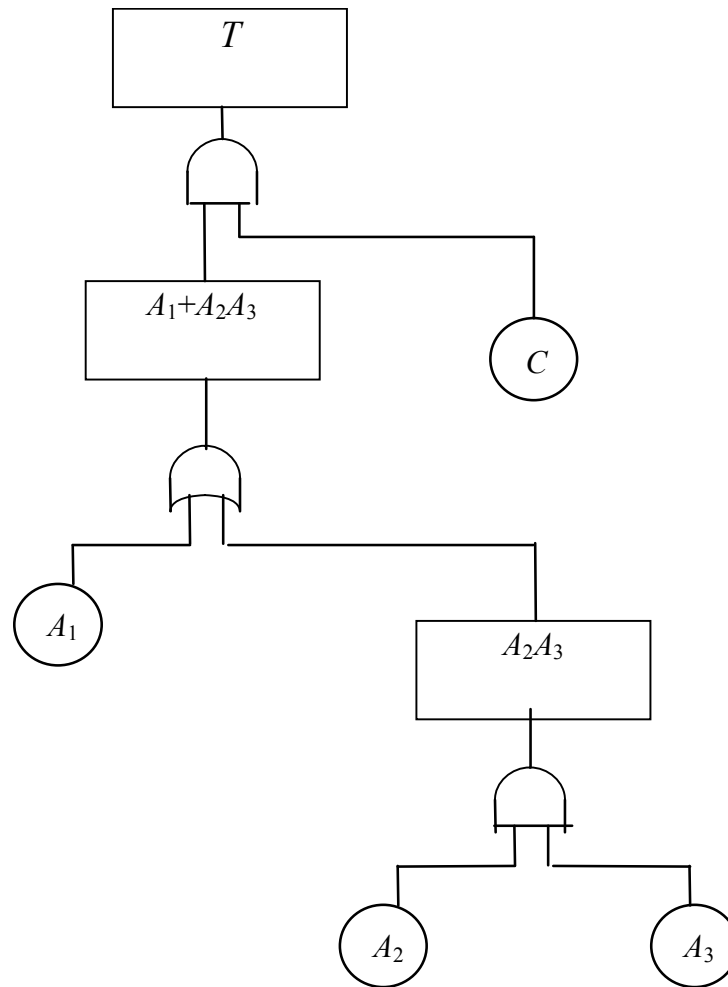


Рис. 8.13. Упрощенное дерево неисправностей.

Таким образом, прежде чем находить количественные показатели надежности и риска, следует упростить выражения с повторяющимися событиями, используя свойства булевой алгебры, в противном случае будут получены ошибочные количественные оценки.

### 8.7. Вероятностная оценка дерева отказов

**Схема ИЛИ.** Для пояснения вероятностного аспекта работы этой схемы проанализируем схему *ИЛИ* с двумя входами, изображенную на рис.8.14. Для этой схемы вероятность появления завершающего события имеет вид

$$P(T) = P(a) + P(b) - P(a \cdot b). \quad (8.5)$$

Если  $a$  и  $b$  - статистически независимые события и произведение  $P(a)P(b)$  очень мало, то полученное выражение можно приближенно записать как.

$$P(T) \approx P(a) + P(b). \quad (8.6)$$

В случае схемы *ИЛИ* с  $n$  входами имеем

$$P(a + b + c + \dots) \approx P(a) + P(b) + P(c) + \dots. \quad (8.7)$$

Это приближенное выражение дает хорошие результаты, если вероятности появления элементарных событий  $P(a), P(b), P(c), \dots$  очень малы, и точный результат, если события  $a, b, c, \dots$  являются несовместными.

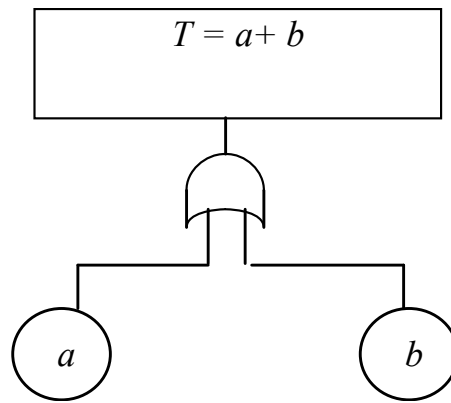


Рис. 8.14. Схема ИЛИ с двумя входами

**Схема И.** В случае схемы И с двумя входами (рис. 8.15) события  $a$  и  $b$  статистически независимы и для получения вероятности появления завершающего события применяется правило умножения вероятностей:  $P(ab) = P(a) \cdot P(b)$ .

Для схемы И с  $n$  входами данное выражение можно записать в общем виде:

$$P(a \cdot b \cdot c \dots) = P(a) \cdot P(b) \cdot P(c) \dots \quad (8.8)$$

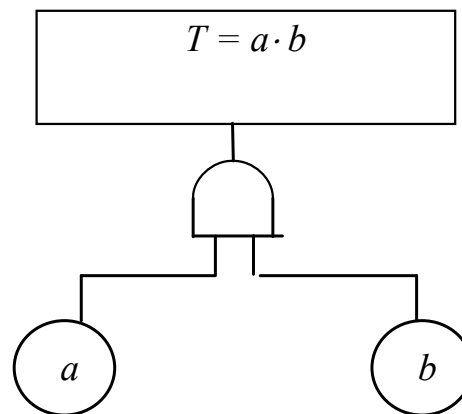


Рис. 8.15. Схема И с двумя входами.

**Пример 8.8.** Требуется вычислить вероятность появления завершающего события дерева неисправностей, изображенного на рис. 8.16.

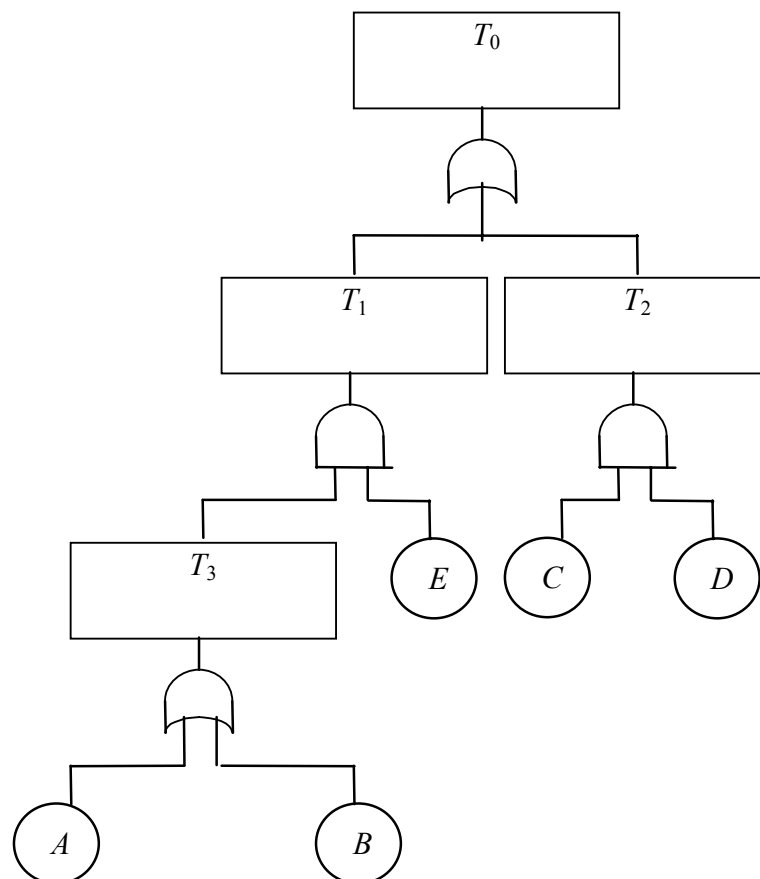


Рис. 8.16. Гипотетическое дерево событий.

Допустим, что основные события  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$  статистически независимы и что  $P(A) = P(B) = P(C) = P(D) = P(E) = 1/4$ . В данном случае дерево не содержит повторяющихся элементарных событий, поэтому можно вычислить вероятность конкретных событий на выходе каждой логической схемы. Однако если бы в ветвях дерева неисправностей присутствовали повторяющиеся события, то прежде чем вычислять вероятности тех или иных событий на выходе каждой логической схемы, необходимо было бы исключить повторяющиеся событий (т.е. получить минимальные сечения).

Для данного дерева неисправностей решение может быть получено следующими двумя методами.

**Метод 1.** Запишем выражение для завершающего события через элементарные события т. е.

$$T_0 = T_1 + T_2. \quad (8.9)$$

Поскольку  $T_2 = CD$ ,  $T_1 = T_3E$ ,  $T_3 = A + B$ , то  $T_0 = E(A + B) + CD$ , и, следовательно,

$$P(T_0) = P(EA + EB + CD). \quad (8.10)$$

Раскрывая полученное выражение, можно получить формулу для вероятности появления завершающего события. При допущении о статистической независимости событий (отказов) можно найти количественную оценку вероятности появления завершающего события.

**Метод 2.** Этот метод определения численного значения вероятности появления завершающего события основан на вычислении вероятностей появления промежуточных событий. В данном случае предполагается, что события (отказы) статистически независимы.

Используя правило умножения вероятностей, получаем следующие количественные результаты для вероятностей появления промежуточных событий и завершающего события:

$$P(T_3) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B) = 1/4 + 1/4 - 1/16 = 7/16,$$

$$P(T_2) = P(C) \cdot P(D) = 1/4 \cdot 1/4 = 1/16,$$

$$P(T_1) = P(T_3) \cdot P(E) = 7/16 \cdot 1/4 = 7/64,$$

$$P(T_0) = P(T_1) + P(T_2) - P(T_1) \cdot P(T_2) = 7/64 + 1/16 - 7/64 \cdot 1/16 = 169/1024.$$

**Пример 8.9.** Допустим, что в дереве неисправностей, изображенном на рис. 8.16, событие  $E$  заменяется событием  $D$  (рис.8.17). Для получения вероятности появления завершающего события нового дерева, изображенного на рис. 8.17, применим *метод 1* из предыдущего примера. Выражение, связывающее завершающее событие с основными событиями (включая повторяющееся событие  $D$ ), имеет вид

$$T_0 = (A + B)D + CD \quad \text{или} \quad T_0 = DA + BD + CD. \quad (8.11)$$

Вероятность появления завершающего события определяется по формуле

$$P(DA + BD + CD) = P(DA) + P(BD) + P(CD) - P(DABD) - P(DACD) - P(BDCD) + P(DABDCD). \quad (8.12)$$

В случае неповторяющихся статистически независимых событий

$$P(DA + BD + CD) = P(A) \cdot P(D) + P(B) \cdot P(D) + P(C) \cdot P(D) - P(D) \cdot P(A) \cdot P(B) - P(A) \cdot P(C) \cdot P(D) - P(B) \cdot P(C) \cdot P(D) + P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D). \quad (8.13)$$

Следовательно, вероятность появления завершающего события равна

$$P(DA + BD + CD) = 1/16 + 1/16 + 1/16 - 1/64 - 1/64 - 1/64 + 1/256 = 37/256.$$

Однако если вначале исключаются повторяющиеся события, то дерево неисправностей, представленное на рис. 8.17, приводится к дереву, показанному на рис. 8.18. Выражение для завершающего события этого дерева неисправностей принимает вид

$$T_0 = DT_1, \quad (8.14)$$

где  $T_1 = A + B + C$ .

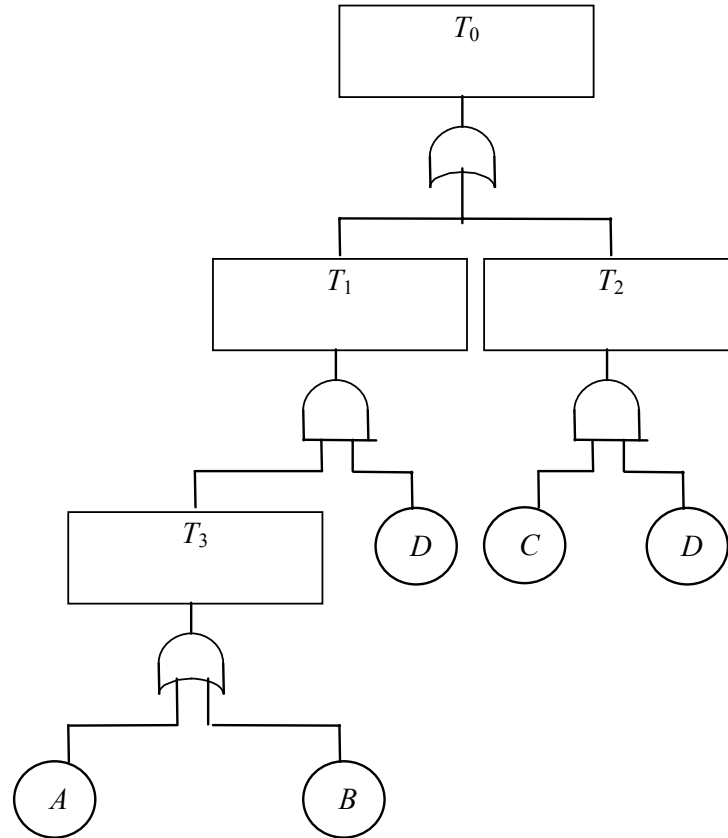


Рис. 8.17. Дерево неисправностей в случае повторяющегося события.

В случае статистически независимых событий вероятность появления завершающего события равна

$$P(DT_1) = P(D) \cdot P(T_1) = 37/64 \cdot 1/4 = 37/256,$$

где  $P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A) \cdot P(B) - P(A) \cdot P(C) - P(B) \cdot P(C) + P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) = 37/64$ .

Заметим, что, если вероятности появления элементарных отказов очень малы, существование зависимости событий не вносит большой погрешности в конечный результат. Однако, прежде чем находить окончательное значение вероятности, необходимо попытаться исключить все случаи зависимости событий в дереве неисправностей.



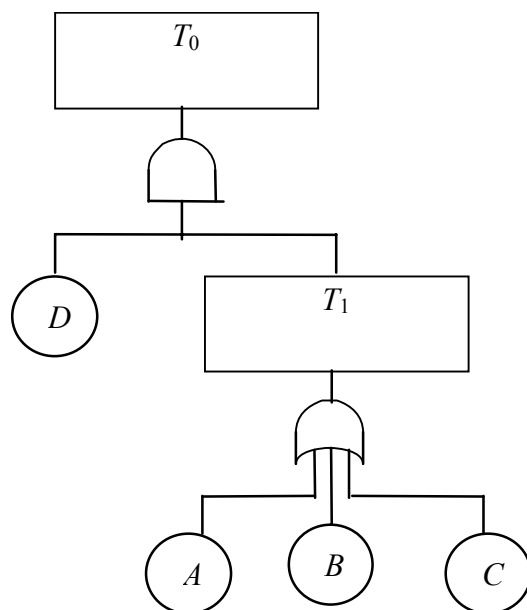


Рис. 8.18. Дерево неисправностей при отсутствии повторяющихся событий.

### 8.8. Преимущества и недостатки метода дерева отказов

Данный метод, как и любой другой, обладает определенными достоинствами и недостатками. Так, например, метод дает представление о поведении системы, но требует от специалистов по надежности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа; помогает дедуктивно выявлять отказы; дает конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений и анализа компромиссных решений; позволяет выполнять количественный и качественный анализ надежности; облегчает анализ надежности сложных систем. Вместе с тем реализация метода требует значительных затрат средств и времени. Кроме того, полученные результаты трудно проверить и трудно учесть состояния частичного отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа. Существенные трудности возникают и при получении в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащих резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов.

## 9. Методы обеспечения надежности сложных систем

### 9.1. Конструктивные способы обеспечения надежности

Одной из важнейших характеристик сложных технических систем является их надежность. Требования к количественным показателям надежности возрастают тогда, когда отказы технической системы приводят к большим затратам материальных средств, либо угрожают безопасности (например, при создании атомных лодок, самолетов или изделий военной техники). Один из разделов технического задания на разработку системы - раздел, определяющий требования к надежности. В этом разделе указывают количественные показатели надежности, которые необходимо подтвердить на каждом этапе создания системы.

На этапе разработки технической документации, являющейся комплектом чертежей, технических условий, методик и программ испытаний, выполнение научно-исследовательских расчетов, подготовки эксплуатационной документации и обеспечение на-

дежности осуществляют способами рационального проектирования и расчетно-экспериментальными методами оценки надежности.

Важное место в обеспечении надежности системы занимает подбор металла, из которого конструируют силовые узлы металлоконструкций, так как от несущих конструкций зависит надежность и долговечность изделия. Для изделий, работающих в стационарных условиях, чаще всего используют обычные углеродистые стали, а для изделий, работающих в условиях переменных нагрузок с высокой интенсивностью, — высоколегированные. В зависимости от внешних воздействующих факторов и условий нагружения подбирают соответствующие материалы с определенными характеристиками.

Существуют несколько методов, с помощью которых можно повысить конструктивную надежность сложной технической системы. Конструктивные методы повышения надежности предусматривают создание запасов прочности металлоконструкций, облегчение режимов работы электроавтоматики, упрощение конструкции, использование стандартных деталей и узлов, обеспечение ремонтпригодности, обоснованное использование методов резервирования.

Наряду с конструктивными методами, обеспечивающими работоспособность системы, широко применяют *вероятностные методы оценки ее надежности* на этапах эскизного и рабочего проектирования. С целью определения количественных показателей надежности составляют функциональную схему и циклограмму работы системы во времени при ее эксплуатации. Более полному пониманию работы системы способствует принципиальная схема, в которой подробно описывают соединение узлов и элементов, а также их назначение. На основании функциональной и принципиальной схем работы системы составляют структурную схему надежности с указанием резервирования отдельных элементов, узлов и каналов. На основании структурной схемы надежности составляют перечень элементов и узлов с указанием интенсивностей отказов, взятых из справочной литературы или полученных по результатам испытаний или эксплуатации. Далее на основании исходных данных выполняют расчет проектной надежности системы.

Анализ и прогнозирование надежности на стадии проектирования дает необходимые данные для оценки конструкции. Такой анализ проводят для каждого варианта конструкции, а также после внесения конструктивных изменений. При обнаружении конструктивных недостатков, снижающих уровень надежности системы, проводят конструктивные изменения и корректируют техническую документацию.

## **9.2. Технологические способы обеспечения надежности изделий в процессе изготовления**

Одним из основных мероприятий на стадии серийного производства, направленных на обеспечение надежности технических систем, является *стабильность технологических процессов*. Научно обоснованные методы управления качеством продукции позволяют своевременно давать заключение о качестве выпускаемых изделий. На предприятиях промышленности применяют два метода *статистического контроля качества*: текущий контроль технологического процесса и выборочный метод контроля.

*Метод статистического контроля (регулирования) качества* позволяет своевременно предупреждать брак в производстве и, таким образом, непосредственно вмешиваться в технологический процесс.

*Выборочный метод контроля* не оказывает непосредственного влияния на производство, так как он служит для контроля готовой продукции, позволяет выявить объем брака, причины его возникновения в технологическом процессе или же качественные недостатки материала.

Анализ точности и стабильности технологических процессов позволяет выявить и исключить факторы, отрицательно влияющие на качество изделия. В общем случае, контроль

стабильности технологических процессов можно проводить следующими методами: графоаналитическим с нанесением на диаграмму значений измеряемых параметров; расчетно-статистическим для количественной характеристики точности и стабильности технологических процессов; а также прогнозирования надежности технологических процессов на основе количественных характеристик приведенных отклонений.

*Расчетно-статистическим методом* определяют коэффициент точности ( $K_T$ ) и коэффициент смещения ( $K_C$ ).

*Коэффициент точности* характеризует соотношение полей допуска исследуемого параметра (размера) и величиной рассеяния размеров деталей в партии. Его значение определяют по формуле

$$K_T = T/\omega, \quad (9.1)$$

где  $T$  - допуск;  $\omega$  - поле рассеяния контролируемого параметра в соответствующей выборке.

*Коэффициент смещения* характеризует относительную величину смещения центра рассеяния размеров от середины поля допуска

$$K_C = (x - \Delta_0)/2, \quad (9.2)$$

где  $x$  - среднее арифметическое значение центра рассеяния;  $\Delta_0$  - координата середины поля допуска.

$$\Delta_0 = (T_n + T_b)/2, \quad (9.3)$$

где  $T_n$  и  $T_b$  - нижнее и верхнее предельные отклонения параметра.

В случае, если коэффициент  $K_T > 1$ , то точность технологического процесса хорошая, если  $K_T = 0,95 \div 1$ , то точность удовлетворительная, при  $K_T \leq 0,9 \div 0,7$ , точность неудовлетворительная.

### **9.3. Обеспечение надежности сложных технических систем в условиях эксплуатации**

Надежность технических систем в условиях эксплуатации определяется рядом эксплуатационных факторов, таких как, квалификация обслуживающего персонала, качество и количество проводимых работ по техническому обслуживанию, наличие запасных частей, использование измерительной и проверочной аппаратуры, а также наличие технических описаний и инструкций по эксплуатации.

В процессе эксплуатации отказы системы принято подразделять на две основные категории — внезапные отказы и постепенные.

*Внезапные отказы* связаны с наличием в изделии скрытых производственных дефектов, причинами конструктивного характера, ошибками обслуживающего персонала.

*Постепенные отказы* системы обусловлены постепенными изменениями параметров. Такое изменение параметров в основном вызвано старением элементной базы системы.

В первом приближении можно принять, что все отказы, возникающие в процессе эксплуатации, являются *независимыми*. Поэтому надежность всей системы при предположении независимости отказов равна:

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3, \quad (9.4)$$

где  $P_1, P_2, P_3$  - вероятности безотказной работы системы соответственно по непрогнозируемым внезапным отказам, внезапным отказам, которые могут быть предотвращены при своевременном техническом обслуживании, и постепенным отказам.

Одной из причин отсутствия отказов элементов системы является качественное техническое обслуживание, которое направлено на предотвращение прогнозируемых внезапных

отказов. Вероятность безотказной работы системы, обусловленная качеством обслуживания, равна:

$$P_2 = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (9.5)$$

где  $P_i$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента, связанная с техническим обслуживанием.

По мере совершенствования обслуживания значение вероятности безотказной работы  $P_2$  приближается к единице.

Замена элементов с возрастающей во времени интенсивностью отказов возможна во всех сложных технических системах. С целью уменьшения во времени интенсивности отказов вводят техническое обслуживание системы, которое позволяет обеспечить поток отказов у сложных систем с конечной интенсивностью в течение заданного срока эксплуатации, т.е. сделать близким к постоянному.

В процессе эксплуатации при техническом обслуживании интенсивность отказов системы, с одной стороны, имеет тенденцию к увеличению, а с другой стороны, - тенденцию к уменьшению в зависимости от того, на каком уровне проведено обслуживание. Если техническое обслуживание проведено качественно, то интенсивность отказов уменьшается, а если это обслуживание проведено плохо, то увеличивается.

Используя накопленный опыт, можно всегда выбрать тот или иной объем функционирования, который обеспечит нормальную работу системы до очередного технического обслуживания с заданной вероятностью безотказной работы. Или, наоборот, задаваясь последовательностью объемов функционирования, можно определить приемлемые сроки проведения технического обслуживания, обеспечивающего работу системы на заданном уровне надежности.

#### **9.4. Пути повышения надежности сложных технических систем при эксплуатации**

Для повышения надежности сложных технических систем в условиях эксплуатации проводят ряд мероприятий, которые можно подразделить на следующие четыре группы:

- 1) разработку научных методов эксплуатации;
- 2) сбор, анализ и обобщение опыта эксплуатации;
- 3) связь проектирования с производством изделий машиностроения;
- 4) повышение квалификации обслуживающего персонала.

*Научные методы эксплуатации* включают в себя научно обоснованные методы подготовки изделия к работе, проведения технического обслуживания, ремонта и других мероприятий по повышению надежности сложных технических систем в процессе их эксплуатации. Порядок и технологию проведения этих мероприятий описывают в соответствующих руководствах и инструкциях по эксплуатации конкретных изделий. Более качественное выполнение эксплуатационных мероприятий по обеспечению надежности изделий машиностроения обеспечивается результатами статистического исследования надежности этих изделий. При эксплуатации изделий большую роль играет накопленный опыт. Значительную часть опыта эксплуатации используют для решения частных организационно-технических мероприятий. Однако накопленные данные необходимо использовать не только для решения задач сегодняшнего дня, но и для создания будущих изделий с высокой надежностью.

Большое значение имеет правильная организация сбора сведений об отказах. Содержание мероприятий по сбору таких сведений определяется типом изделий и особенностями эксплуатации этих изделий. Возможными источниками статистической информации могут быть сведения, полученные по результатам различных видов испытаний и эксплуатации, ко-

торые оформляются периодически в виде отчетов о техническом состоянии и надежности изделий.

Изучение особенностей их поведения дает возможность использовать накопленные данные для проектирования будущих изделий. Таким образом, сбор и обобщение данных об отказах изделий - одна из важнейших задач, на которую должно быть обращено особое внимание.

Эффективность эксплуатационных мероприятий во многом зависит от *квалификации обслуживающего персонала*. Однако влияние этого фактора неодинаково. Так, например, при выполнении в процессе обслуживания довольно простых операций влияние высокой квалификации работника сказывается мало, и наоборот, квалификация обслуживающего персонала играет большую роль при выполнении сложных операций, связанных с принятием субъективных решений (например, при регулировании клапанов и систем зажигания в автомобилях, при ремонте телевизора и т.д.).

### **9.5. Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надежности техники при эксплуатации**

Известно, что в процессе эксплуатации изделие определенное время используют по назначению для выполнения соответствующей работы, некоторое время она транспортируется и хранится, а часть времени идет на техническое обслуживание и ремонт. При этом для сложных технических систем в нормативно-технической документации устанавливают виды технических обслуживания (ТО-1, ТО-2,...) и ремонтов (текущий, средний или капитальный). На стадии эксплуатации изделий проявляются технико-экономические последствия низкой надежности, связанные с простоями техники и затратами на устранение отказов и приобретение запасных частей. С целью поддержания надежности изделий на заданном уровне в процессе эксплуатации необходимо проводить комплекс мероприятий, который может быть представлен в виде двух групп — мероприятия по соблюдению правил и режимов эксплуатации; мероприятия по восстановлению работоспособного состояния.

К первой группе мероприятий относятся обучение обслуживающего персонала, соблюдение требований эксплуатационной документации, последовательности и точности проводимых работ при техническом обслуживании, диагностический контроль параметров и наличие запасных частей, осуществление авторского надзора и т.п.

К основным мероприятиям второй группы относятся корректирование системы технического обслуживания, периодический контроль за состоянием изделия и определение средствами технического диагностирования остаточного ресурса и предотказного состояния, внедрение современной технологии ремонта, анализ причин отказов и организация обратной связи с разработчиками и изготовителями изделий.

Многие изделия значительную часть времени эксплуатации находятся в состоянии хранения, т.е. не связаны с выполнением основных задач. Для изделий, работающих в таком режиме, преобладающая часть отказов связана с коррозией, а также воздействием пыли, грязи, температуры и влаги. Для изделий, находящихся значительную часть времени в эксплуатации, преобладающая часть отказов связана с износом, усталостью или механическим повреждением деталей и узлов. В состоянии простоя интенсивность отказов элементов существенно меньше, чем в рабочем состоянии. Так, например, для электромеханического оборудования это соотношение соответствует 1:10, для механических элементов это соотношение составляет 1:30, для электронных элементов 1:80.

Необходимо отметить, что с усложнением техники и расширением областей ее использования возрастает роль этапа эксплуатации техники в суммарных затратах на создание и использование технических систем. Затраты на поддержание в работоспособном состоянии за счет технических обслуживания и ремонтов превышают стоимость новых изделий в следующее число раз: тракторов и самолетов в 5-8 раз; металлорежущих станков в 8-15 раз; ра-

диоэлектронной аппаратуры в 7-100 раз.

Техническая политика предприятий должна быть направлена на снижение объемов и сроков проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту техники за счет повышения надежности и долговечности основных узлов.

Консервация машины в состоянии поставки помогает сохранить ее работоспособность, как правило, в течение 3-5 лет. Для поддержания надежности машины в процессе эксплуатации на заданном уровне объем производства запасных частей должен составлять 25-30 % стоимости машин.

## 10. Основы теории и практики техногенного риска

### 10.1. Понятие техногенного риска

При решении комплексных вопросов безопасности в развитых странах широко применяется методология риска, основу которой составляет определение последствий и вероятности нежелательных событий. Используя количественные показатели риска, в принципе можно «измерять» потенциальную опасность и даже сравнивать опасности различной природы. При этом в качестве показателей опасности обычно понимают индивидуальный или социальный риск гибели людей (или, в общем случае, причинения определенного ущерба).

В широком смысле слова риск выражает возможную опасность, вероятность нежелательного события. Применительно к проблеме безопасности жизнедеятельности таким событием может быть ухудшение здоровья или смерть человека, авария или катастрофа технической системы или устройства, загрязнение или разрушение экологической системы, гибель группы людей или возрастание смертности населения, материальных ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличения затрат на безопасность.

Аналитически риск выражает частоту реализации опасностей по отношению к возможному их числу. В общем виде

$$R = \frac{N(t)}{Q(f)}, \quad (10.1)$$

где  $R$  – риск;  $N$  – количественный показатель частоты нежелательных событий в единицу времени  $t$ ;  $Q$  – число объектов риска, подверженных определенному фактору риска  $f$ .

Вероятность возникновения опасности – величина, существенно меньшая единицы.

Ожидаемый (прогнозируемый) риск  $R$  – это произведение частоты реализации конкретной опасности  $f$  на произведение вероятностей нахождения человека в «зоне риска» при различном регламенте технологического процесса:

$$R = f \prod_i^n p_i (i = 1, 2, 3, \dots, n), \quad (10.2)$$

где  $f$  – число несчастных случаев (смертельных исходов) от данной опасности чел<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>. (для отечественной практики  $f = K_{\text{ч}} \cdot 10^{-3}$ , т.е. соответствует значению коэффициента частоты несчастного случая  $K_{\text{ч}}$ , деленного на 1000);  $\prod_i^n p_i$  – произведение вероятностей нахождения работника в «зоне риска».

Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций – результат определенной совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками.

Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать индивидуальный, техногенный, экологический, социальный и экономический риск. Каждый вид его обуславливают характерные источники и факторы риска.

*Техногенный риск* – комплексный показатель надежности элементов техносферы. Он выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений:

$$R_T = \frac{\Delta T(t)}{T(f)}, \quad (10.3)$$

где  $R_T$  – технический риск;  $\Delta T$  – число аварий в единицу времени  $t$  на идентичных технических системах и объектах;  $T$  – число идентичных технических систем и объектов, подверженных общему фактору риска  $f$ .

Источники технического риска: низкий уровень научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; опытное производство новой техники; серийный выпуск небезопасной техники; нарушение правил безопасной эксплуатации технических систем.

Наиболее распространенные факторы технического риска: ошибочный выбор по критериям безопасности направлений развития техники и технологий; выбор потенциально опасных конструктивных схем и принципов действия технических систем; ошибки в определении эксплуатационных нагрузок; неправильный выбор конструкционных материалов; недостаточный запас прочности; отсутствие в проектах технических средств безопасности; некачественная доводка конструкции, технологии, документации по критериям безопасности; отклонения от заданного химического состава конструкционных материалов; недостаточная точность конструктивных размеров; нарушение режимов термической и химико-термической обработки деталей; нарушение регламентов сборки и монтажа конструкций и машин; использование техники не по назначению; нарушение паспортных (проектных) режимов эксплуатации; несвоевременные профилактические осмотры и ремонты; нарушение требований транспортирования и хранения.

## 10.2. Методология анализа и оценки риска

Методологическое обеспечение анализа риска – это совокупность методов, методик и программных средств, позволяющих всесторонне выявить опасности и оценить риск чрезвычайной ситуации, источником которой может являться промышленный объект. Выполнение требований к методологическому обеспечению анализа опасностей и риска необходимо для повышения точности и объективности результатов исследования опасностей промышленного объекта, а также для повышения эффективности выработки мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций.

Оценка риска – это анализ происхождения (возникновения) и масштабы риска в конкретной ситуации.

Вкладом в реализацию Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и определённым шагом на пути решения проблемы оценки риска следует считать разработку Госгортехнадзором России «Методических указаний по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД 03-418-01)». Впервые в отечественную нормативную систему введён документ, содержащий терминологию и методологию анализа риска. Риск или степень риска предлагается рассматривать как сочетание частоты (вероятности) и последствий конкретного опасного события. Математическое выражение риска  $P$  – это соотношение числа неблагоприятных проявлений опасности  $n$  к их возможному числу  $N$  за определённый период времени, т.е.  $P = n/N$ . Помимо этого используется понятие «степень риска»  $R$ , т.е. вероятность наступления нежелательного события с учётом размера возможного ущерба от события. Степень риска можно представить как математическое ожидание величины ущерба от нежелательного события:

$$R(m) = \sum_{i=1}^n p_i m_i, \quad (10.4)$$

где  $p_i$  – вероятность наступления события, связанного с ущербом;  $m_i$  – случайная величина ущерба, причинённого экономике, здоровью и т.п.

Принято различать:

- индивидуальный риск – вероятность гибели человека при данном виде деятельности;
- социальный риск – зависимость числа погибших людей от частоты возникновения события, вызывающего поражение этих людей.

Значение индивидуального риска используется для количественной оценки потенциальной опасности конкретного рабочего места, вида деятельности, рабочей зоны и т.п., социального – для интегральной количественной оценки опасных производственных объектов, характеристики масштаба воздействия аварии.

Несмотря на различие в подходах к последовательности этапов процесса управления риском, можно выделить три общие для всех документов составляющие этого процесса: информацию о производственной безопасности, анализ риска и контроль производственной безопасности. Анализ риска базируется на собранной информации и определяет меры по контролю безопасности технологической системы, поэтому основная задача анализа риска заключается в том, чтобы обеспечить рациональное основание для принятия решений в отношении риска (рис. 10.1).

Анализ риска или риск-анализ – это систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска для отдельных лиц или групп населения, имущества или окружающей среды.

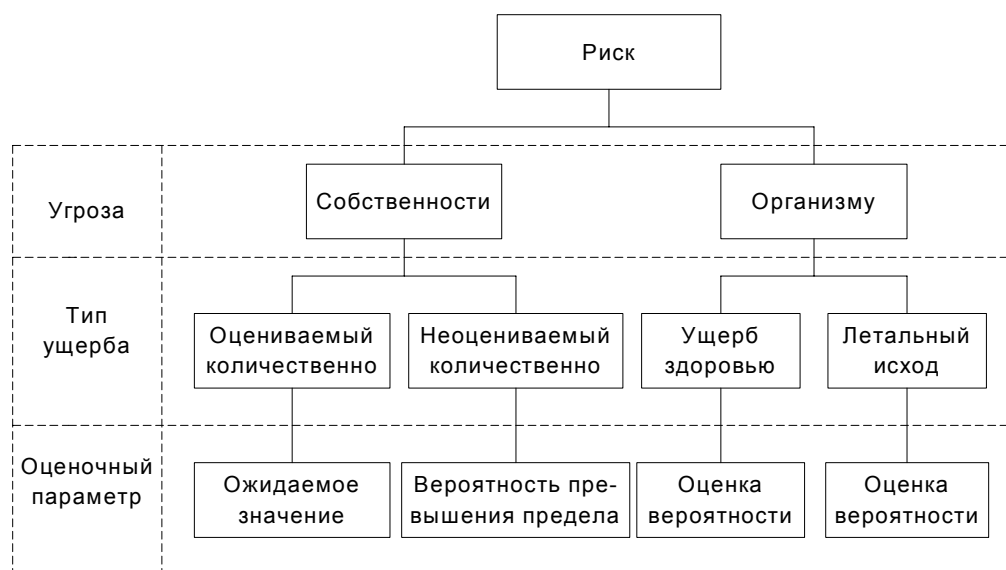


Рис.10.1. Схема оценки риска [16]

Анализ риска заключается в выявлении (идентификации) опасностей и оценке риска, когда под опасностью понимается источник потенциального ущерба или вреда или ситуация с возможностью нанесения ущерба, а под идентификацией опасности – процесс выявления и признания, что опасность существует, и определение ее характеристик. Применение понятия риск, таким образом, позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Риск фактически есть мера опасности.

Оценка риска включает в себя анализ частоты, анализ последствий и их сочетание.

Анализ риска проводится по следующей общей схеме:

1. Планирование и организация;
2. Идентификация опасностей;



- 2.1. Выявление опасностей;
- 2.2. Предварительная оценка характеристик опасностей;
3. Оценка риска;
  - 3.1. Анализ частоты;
  - 3.2. Анализ последствий;
  - 3.3. Анализ неопределенностей;
4. Разработка рекомендаций по управлению риском.

Первое, с чего начинается любой анализ риска, – это планирование и организация работ. Поэтому на первом этапе необходимо:

- указать причины и проблемы, вызывавшие необходимость проведения риск-анализа;
- определить анализируемую систему и дать ее описание;
- подобрать соответствующую команду для проведения анализа;
- установить источники информации о безопасности системы;
- указать исходные данные и ограничения, обуславливающие пределы риск-анализа;
- четко определить цели риск-анализа и критерий приемлемого риска.

Следующий этап анализа риска – идентификация опасностей. Основная задача – выявление (на основе информации о данном объекте, результатов экспертизы и опыта работы подобных систем) и четкое описание всех присущих системе опасностей. Здесь же проводится предварительная оценка опасностей с целью выбора дальнейшего направления деятельности:

- прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей;
- провести более детальный анализ риска;
- выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

В принципе процесс риск-анализа может заканчиваться уже на этапе идентификации опасностей.

После идентификации опасностей переходят к этапу оценки риска, на котором идентифицированные опасности должны быть оценены на основе критериев приемлемого риска, чтобы идентифицировать опасности с неприемлемым уровнем риска, что является основой для разработки рекомендации и мер по уменьшению опасностей. При этом критерий приемлемого риска и результаты оценки риска могут быть выражены как качественно (в виде текстового описания), так и количественно (например, в виде числа несчастных случаев или аварий в год).

Согласно определению оценка риска включает в себя анализ частоты и анализ последствий. Однако, когда последствия незначительны или частота крайне мала, достаточно оценить один параметр. Для анализа частоты обычно используются:

- исторические данные, соответствующие по типу системы, объекта или вида деятельности;
- статистические данные по аварийности и надежности оборудования;
- логические методы анализа «деревьев событий» или «деревьев отказов» (при ортодоксальном подходе к предмету эти методы обычно рассматриваются как единственно приемлемые для оценки риска);
- экспертная оценка с учетом мнения специалистов в данной области.

Анализ последствий включает оценку воздействий на людей, имущество или окружающую среду. Для прогнозирования последствий необходимы модели аварийных процессов, понимание их сущности и сущности используемых поражающих факторов, так как нужно оценить физические эффекты нежелательных событий (пожаров, взрывы, выбросы токсичных веществ) и использовать критерии поражения изучаемых объектов воздействия.

На этапе оценки риска следует проанализировать возможную неопределенность результатов, обусловленную неточностью информации по надежности оборудования и ошибкам персонала, а также принятых допущений применяемых при расчете моделей аварийного процесса. Анализ неопределенности – это перевод неопределенности исходных параметров и предложений, использованных при оценке риска, в неопределенность результатов.

Наибольший объем рекомендаций по обеспечению безопасности вырабатывается с применением качественных (инженерных) методов анализа риска, позволяющие достигать основных целей риска-анализа при использовании меньшего объема информации и затрат труда. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях – и единственно допустимы, в частности, для сравнения опасностей различной природы или при экспертизе особо опасных сложных технических систем.

Разработка рекомендаций по уменьшению риска (управлению риском) является заключительным этапом анализа риска. Рекомендации могут признать существующий риск приемлемым или указывать меры по уменьшению риска, т.е. меры по его управлению. Меры по управлению риска могут иметь технический, эксплуатационный или организационный характер.

### 10.3. Качественные методы анализа риска

Объектом анализа опасностей как источника техногенного риска является система «человек-машина-окружающая среда (ЧМС)», в которой в единый комплекс объединены технические объекты, люди и окружающая среда, взаимодействующие друг с другом.

Анализ опасностей и риска позволяет определить источники опасностей, потенциальные аварии и катастрофы, последовательности развития событий, вероятности аварий, величину риска, величину последствий, пути предотвращения аварий и смягчения последствий.

Методы определения потенциального риска можно разделить на:

- инженерные методы с использованием статистики, когда производится расчет частот, проводится вероятностный анализ безопасности и построение деревьев опасности.

- модельные методы: основаны на построении моделей воздействия опасных и вредных факторов на отдельного человека, на профессиональные и социальные группы населения.

- экспертные методы: включают определение вероятностей различных событий на основе опроса опытных специалистов–экспертов.

- социологические методы, которые основаны на опросе населения.

Для отражения различных аспектов опасности эти методы применяются в комплексе.

Анализ риска описывает опасности качественно и количественно и заканчивается планированием предупредительных мероприятий. Он базируется на знании алгебры логики и событий, теории вероятностей, статистическом анализе, требует инженерных знаний и системного подхода.

Качественные методы анализа риска позволяют определить источники опасностей, потенциальные аварии и несчастные случаи, последовательности развития событий, пути предотвращения аварий (несчастных случаев) и смягчения последствий.

Анализ риска начинают с предварительного исследования, позволяющего идентифицировать источники опасности. Затем проводят детальный качественный анализ.

Выбор качественного метода анализа риска зависит от цели анализа, назначения объекта и его сложности. Качественные методы анализа опасностей включают:

- предварительный анализ опасностей;
- анализ последствий отказов;
- анализ опасностей методом потенциальных отклонений;
- анализ ошибок персонала;
- причинно-следственный анализ;
- анализ опасностей с помощью «дерева причин»;
- анализ опасностей с помощью «дерева последствий».

*Предварительный анализ опасностей (ПАО)*, заключающийся в выявлении источника опасностей, определении системы или событий, которые могут вызывать опасные состояния, характеристике опасностей в соответствии с вызываемыми ими последствиями.

Предварительный анализ опасностей осуществляют в следующем порядке:

- изучают технические характеристики объекта, системы, процесса, используемые энергетические источники, рабочие среды, материалы и устанавливают их повреждающие свойства;

- устанавливают нормативно-техническую документацию, действие которой распространяется на данный технический объект, систему, процесс;

- проверяют существующую техническую документацию на ее соответствие нормам и правилам безопасности;

- составляют перечень опасностей, в котором указывают идентифицированные источники опасностей, повреждающие факторы, потенциальные аварии, выявленные недостатки.

В целом ПАО представляет собой первую попытку выявить оборудование технической системы (в ее начальном варианте) и отдельные события, которые могут привести к возникновению опасностей. Этот анализ выполняется на начальном этапе разработки системы. Детальный анализ возможных событий обычно проводится с помощью дерева отказов, после того как система полностью определена.

*Анализ последствий отказов (АПО)* – качественный метод идентификации опасностей, основанный на системном подходе и имеющий характер прогноза. АПО является анализом индуктивного типа, с помощью которого систематически, на основе последовательного рассмотрения одного элемента за другим, анализируются все возможные виды отказов или аварийные ситуации и выявляются их результирующие воздействия на систему (рис.10.2).

Отдельные аварийные ситуации и виды отказов элементов позволяют, определить их воздействие на другие близлежащие элементы и систему в целом. АПО осуществляют в следующем порядке:

- техническую систему (объект) подразделяют на компоненты;
- для каждого компонента выявляют возможные отказы;
- изучают потенциальные аварии, которые могут вызвать отказы на исследуемом объекте;
- отказы ранжируют по опасностям и разрабатывают предупредительные меры.

Результаты анализа последствий отказа представляются в виде таблиц с перечнем оборудования, видов и причин возможных отказов, с частотой, последствиями, критичностью, средствами обнаружения неисправности (сигнализаторы, приборы контроля и т.п.) и рекомендациями по уменьшению опасности.

В качестве примера в табл. 10.1 приведены показатели (индексы) уровня и критерии критичности по вероятности и тяжести последствий отказа. Для анализа выделены четыре группы, которым может быть нанесен ущерб от отказа: персонал, население, имущество (оборудование, сооружения, здания, продукция и т.п.), окружающая среда.

Таблица 10.1

*Матрица «вероятность – тяжесть последствий»*

Отказ	Частота возникновения отказа в год	Тяжесть последствий отказа			
		катастрофического	критического	некритического	с пренебрежимо малыми последствиями
Частный	$>1$	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>C</i>
Вероятный	$10^{-2}$	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Возможный	$10^{-2}-10^{-4}$	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Редкий	$10^{-4}-10^{-6}$	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Практически невероятный	$<10^{-6}$	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>D</i>

В табл. 10.1 применены следующие варианты критериев:

а) критерии отказов по тяжести последствий:

- *катастрофический отказ* — приводит к смерти людей, существенному ущербу имуществу, наносит невосполнимый ущерб окружающей среде;

- *критический (некритический) отказ* — угрожает (не угрожает) жизни людей, приводит (не приводит) к существенному ущербу имуществу, окружающей среде;

- *отказ с пренебрежимо малыми последствиями* — отказ, не относящийся по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий;

б) категории (критичность) отказов:

*A* — обязателен количественный анализ риска или требуются особые меры обеспечения безопасности;

*B* — желателен количественный анализ риска или требуется принятие определенных мер безопасности;

*C* — рекомендуется проведение качественного анализа опасностей или принятие некоторых мер безопасности;

*D* — анализ и принятие специальных (дополнительных) мер безопасности не требуются.

Этим методом можно оценить опасный потенциал любого технического объекта. По результатам анализов отказов могут быть собраны данные о частоте отказов, необходимые для количественной оценки уровня опасности рассматриваемого объекта.

*Анализ опасностей методом потенциальных отклонений (АОМПО)* включает процедуру искусственного создания отклонений с помощью ключевых слов. Для этого разбивают технологический процесс или техническую систему на составные части и, создавая с помощью ключевых слов отклонения, систематично изучают их потенциальные причины и те последствия, к которым они могут привести на практике.

В процессе анализа для каждой составляющей опасного производственного объекта или технологического блока определяются возможные отклонения, причины и указания по их недопущению. При характеристике отклонения используются ключевые слова «нет», «больше», «меньше», «так же, как», «другой», «иначе, чем», «обратный» и т.п. Применение ключевых слов помогает исполнителям выявить все возможные отклонения. Конкретное сочетание этих слов с технологическими параметрами определяется спецификой производства.

Примерное содержание ключевых слов следующее:

«нет» — отсутствие прямой подачи вещества, когда она должна быть;

«больше (меньше)» — увеличение (уменьшение) значений режимных переменных по сравнению с заданными параметрами (температуры, давления, расхода);

«так же, как» — появление дополнительных компонентов (воздух, вода, примеси);

«другой» — состояние, отличающиеся от обычной работы (пуск, остановка, повышение производительности и т.д.);

«иначе, чем» — полное изменение процесса, непредвиденное событие, разрушение, разгерметизация оборудования;

«обратный» — логическая противоположность замыслу, появление обратного потока вещества.

Отклонения, имеющие повышенные значения критичности, далее рассматриваются более детально, в том числе при построении сценариев аварийных ситуаций и количественной оценки риска.

Степень опасности отклонений может быть определена количественно путем оценки вероятности и тяжести последствий рассматриваемой ситуации по критериям критичности аналогично методу АПО (см. табл. 10.1).

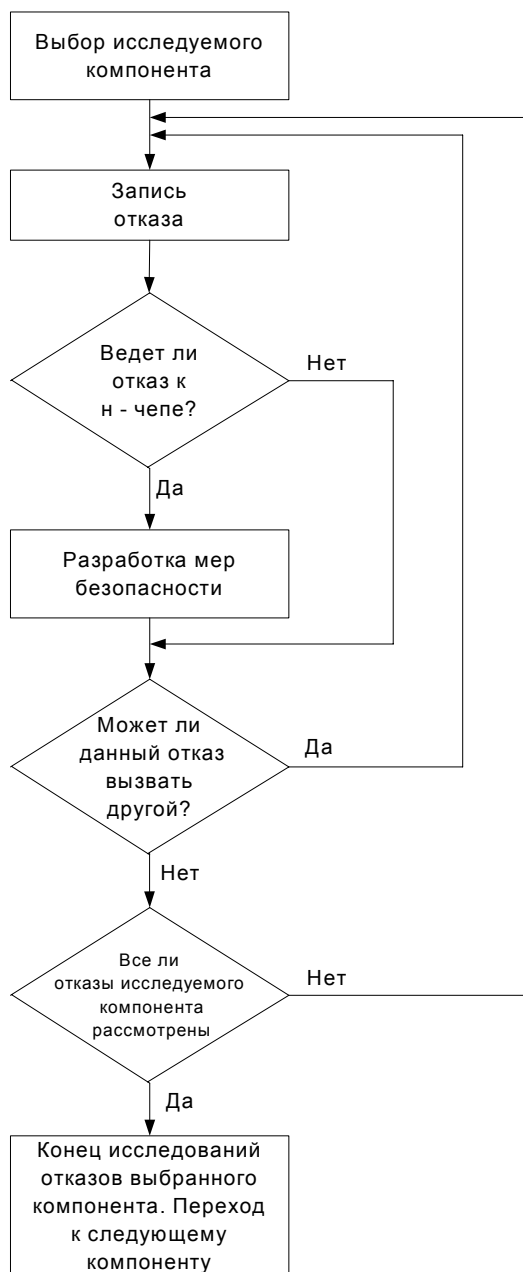


Рис. 10.2. Алгоритм исследования отказов [16]

*Анализ ошибок персонала (АОП)* является одним из важнейших элементов методологии оценки опасностей с учетом человеческого фактора, позволяющий охарактеризовать как ошибки, инициирующие или усугубляющие аварийную ситуацию, так и способность персонала совершить корректирующие действия по управлению аварией.

АОП включает следующие этапы:

- выбор системы и вида работы;
- определение цели;
- идентификацию вида потенциальной ошибки;
- идентификацию последствий;
- идентификацию возможности исправления ошибки;
- идентификацию причины ошибки;

- выбор метода предотвращения ошибки;
- оценку вероятности ошибки;
- оценку вероятности исправления ошибки;
- расчет риска;
- выбор путей снижения риска.

*Причинно-следственный анализ* (ПСА) выявляет причины происшедшей аварии или катастрофы и является составной частью общего анализа опасностей. Он завершается прогнозом новых аварий и составлением плана мероприятий по их предупреждению. ПСА включает следующие этапы:

- сбор информации о точном и объективном описании аварии;
- составление перечня реальных событий, предшествовавших аварии;
- построение ориентированного графа – «дерева причин», начиная с последней стадии развития событий, т.е. с самой аварии;
- выявляют логические связи «дерева причин»;
- формулирование предупредительных мер с целью исключения повторения аварии данного типа или для избежания аналогичных аварий.

Анализ опасностей с помощью «дерева причин» потенциальной аварии (АОДП) или идентичного ему «дерева отказов» позволяет выявить комбинации отказов (неполадок) оборудования, ошибок персонала и внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящих к основному событию, т.е. аварийной ситуации.

Метод используется для анализа возникновения аварийной ситуации и расчета ее вероятности (на основе задания вероятностей исходных событий).

Анализ опасных ситуаций с помощью «дерева» выполняют в следующем порядке:

- выбирают потенциальную аварию или отказ, который может привести к аварии;
- выявляют все факторы, которые могут привести к заданной аварии, включая все потенциальные инциденты;
- по результатам этого анализа строят ориентированный граф-«дерево», вершина (корень) которого занумерована потенциальной аварией.

Проведение анализа возможно только после детального изучения рабочих функций всех компонентов рассматриваемой технической системы. На работу системы оказывает влияние человеческий фактор, например, возможность совершения оператором ошибки. Поэтому желательно все потенциальные инциденты - "отказы операторов" вводить в содержание «дерева отказов».

Качественный анализ дерева отказов заключается в определении аварийных сочетаний.

*Аварийное сочетание* - это определенный набор исходных событий. Если все эти исходные события случаются, существует гарантия, что конечное событие происходит. Большие системы имеют значительное число видов отказов. Чтобы упростить анализ, следует рассматривать только те виды отказов, которые являются основными. Поэтому вводится понятие минимального аварийного сочетания.

*Минимальное аварийное сочетание* - это такое сочетание, в котором при удалении любого исходного события оставшиеся события вместе больше не являются аварийным сочетанием. Аварийное сочетание, включающее другие сочетания, не является минимальным аварийным сочетанием.

**Пример 10.1.** На рис. 10.3. приведено «дерево отказа» (в отечественной литературе встречаются и иные наименования этого «дерева»: «дерево отказов», «дерево неполадок» «дерево происшествий» и т.п.), используемого для анализа причин возникновения аварийных ситуаций при автоматизированной заправке емкости.

Структура «дерева отказа» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в узлах «деревьев» используются знаки «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий. Так, «дерево», представленное на рис. 10.3, имеет промежуточные события (прямоугольники), тогда как в нижней части «дерева» кругами с цифрами показаны постулируемые исходные события-предпосылки.

Анализ «дерева отказа» позволяет выделить ветви прохождения сигнала к головному событию (в нашем случае на рис. 10.3 их три), а также указать связанные с ними минимальные пропускные сочетания минимальные отсечные сочетания.

Минимальные пропускные сочетания — это набор исходных событий-предпосылок (на рис.10.3 отмечены цифрами), обязательное (одновременное) возникновение которых достаточно для появления головного события (аварии). Для «дерева», отображенного на рис. 10.3, такими событиями и (или) сочетаниями являются: {12}, {13}, {1-7}, {1-8}, {1-9}, {1-10}, {1-11}, {2-7}, {2-8}, {2-9}, {2-10}, {2-11}, {3-7}, {3-8}, {3-9}, {3-10}, {3-11}, {4-7}, {4-8}, {4-9}, {4-10}, {4-11}, {5-6-7}, {5-6-8}, {5-6-9}, {5-6-10}, {5-6-11}.





Рис. 10.3. «Дерево отказа» заправочной операции

Минимальные пропускные сочетания используются главным образом для выявления «слабых» мест.

Минимальные отсечные сочетания — набор исходных событий, который гарантирует отсутствие головного события при условии не возникновения ни одного из составляющих этот набор событий: {1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 12 - 13}, {1 - 2 - 3 - 4 - 6 - 12 - 13}, {7 - 8 - 9 - 10 - 12 - 13}.

Минимальные отсечные сочетания используются главным образом для определения наиболее эффективных мер предупреждения аварии.

«Дерево отказов» отражает статический характер событий. Построением нескольких деревьев можно отразить их динамику, т. е. развитие событий во времени. Для определения последовательности событий при аварии, включающей сложные взаимодействия между техническими системами обеспечения безопасности, используется «дерево событий».

Анализ опасностей с помощью «дерева событий» или идентичного ему «дерева последствий» потенциальной аварии (АОДПО) отличается от АОДП тем, что в этом случае задается потенциальное событие – инициатор, и исследуют всю группу событий – последствий, к которым оно может привести.

Анализ «дерева событий» – алгоритм построения последовательности событий, исходящих из основного события (аварийная ситуация). Используется для анализа развития аварийной ситуации. Частота каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается умножением частоты основного события на вероятность конечного события.

**Пример 10.2.** На рис. 10.4. представлено «дерево событий» для количественного анализа различных сценариев аварий на установке первичной переработки нефти.

Цифры рядом с наименованием события показывают условную вероятность возникновения этого события. При этом вероятность возникновения иницирующего события (выброс нефти из резервуара) принята равной 1. Значение частоты возникновения отдельного события или сценария пересчитывается путем умножения частоты возникновения иницирующего события на условную вероятность развития аварии по конкретному сценарию.

Дерево событий начинается с единственного анализируемого события в корне дерева, называемого конечным событием. На следующем уровне появляются события, которые могут вызвать конечное событие, аналогично дерево продолжается. Дерево оканчивается, когда оно доходит до уровня отказов элементов.

Разновидностью «дерева событий» является «*дерево решений*». В «дереве событий» рабочие состояния системы не рассматриваются, так что сумма вероятностей всех событий не равна единице. В «дереве решений» все возможные состояния системы выражаются через состояния элементов. «Дерево решений» может использоваться, если отказы всех элементов независимы или если имеются элементы с несколькими возможными состояниями, а также есть односторонние зависимости. Они не могут использоваться при наличии двусторонних зависимостей и не обеспечивают проведения логического анализа при выборе начальных событий.

*Анализ «дерева причин – последствий»* начинается с выбора критического события. Критические события выбирают таким образом, чтобы они служили удобными отправными точками для анализа, причем большинство аварийных ситуаций развивается за критическим событием в виде цепи отдельных событий. Типичными критическими событиями, ведущими к аварийным ситуациям, могут быть отклонения основных параметров технологического процесса, например, в баках или контейнерах; расширение диапазона давления или степени загрязнения; начало процесса выпуска партии продукции или начало процедуры пуска или остановки; событие, которое приводит в действие систему обеспечения безопасности.



Рис. 10.4. «Дерево событий» аварий на установке первичной переработки нефти

«Выявление последствий», являющееся частью анализа «дерева причин - последствий», начинается с выбора первичного события с последующим рассмотрением всей цепи событий. На различных ступенях цепи могут разветвляться и развиваться по двум направлениям в зависимости от различных условий. Например, начало пожара может привести к двум цепям событий: постепенному уничтожению всего предприятия или включению пожарной сигнализации с вызовом пожарной команды. Цепь событий может принять различные взаимоисключающие формы в зависимости от изменяющихся условий. Например, распространение пожара может зависеть от того, произошел ли он в час пик, что может помешать своевременному прибытию пожарной команды на место происшествия.

Процедура построения диаграммы последствий состоит из выбора первого инициирующего события, за которым следуют другие события, определенные на данном этапе работы. При анализе «дерева причин - последствий» используются комбинированные методы «дерева отказов» (выявить причины) и «дерева событий» (показать последствия), причем все явления рассматриваются в естественной последовательности их появления.

#### 10.4. Количественная оценка риска

Количественный анализ опасностей дает возможность определить вероятности аварий и несчастных случаев, величину риска, величину последствий. Методы расчета вероятностей и статистический анализ являются составными частями количественного анализа опасностей. Установление логических связей между событиями необходимо для расчета вероятностей аварии или несчастного случая.

Методы количественного анализа риска, как правило, характеризуются расчетом нескольких показателей риска и могут включать один или несколько вышеупомянутых методов (или использовать их результаты). Проведение количественного анализа требует высокой квалификации исполнителей, большого объема информации по аварийности, надежно-

сти оборудования, выполнения экспертных работ, учета особенностей окружающей местности, метеоусловий, времени пребывания людей в опасных зонах и других факторов.

Количественный анализ риска позволяет оценивать и сравнивать различные опасности по единым показателям, он наиболее эффективен:

- на стадии проектирования и размещения опасного производственного объекта;
- при обосновании и оптимизации мер безопасности;
- при оценке опасности крупных аварий на опасных производственных объектах, имеющих однотипные технические устройства (например, магистральные трубопроводы);
- при комплексной оценке опасностей аварий для людей, имущества и окружающей природной среды.

При анализе опасностей сложные системы разбивают на подсистемы. Подсистемой называют часть системы, которую выделяют по определенному признаку, отвечающему конкретным целям и задачам функционирования системы. Подсистема может рассматриваться как самостоятельная система, состоящая из других подсистем, т.е. иерархическая структура сложной системы может состоять из подсистем различных уровней, где подсистемы низших уровней входят составными частями в подсистемы высших уровней (рис. 10.5). В свою очередь, подсистемы состоят из компонентов – частей системы, которые рассматриваются без дальнейшего деления как единое целое.

Логический анализ внутренней структуры системы и определение вероятности нежелательных событий  $E$  как функции отдельных событий  $E_i$  являются одной из задач анализа опасностей.

Через  $P\{E_i\}$  будем обозначать вероятность нежелательного события  $E_i$ .

Для полной группы событий

$$\sum_{i=1}^n P\{E_i\} = 1. \quad (10.5)$$

Для равновероятных событий ( $P\{E_i\} = p, i = 1, 2, \dots, n$ ), образующих полную группу событий, вероятность равна

$$p = 1/n. \quad (10.6)$$

Противоположные события  $E_i$  и  $(-E_i)$  образуют полную группу, поэтому

$$P\{E_i\} = 1 - P\{-E_i\}. \quad (10.7)$$

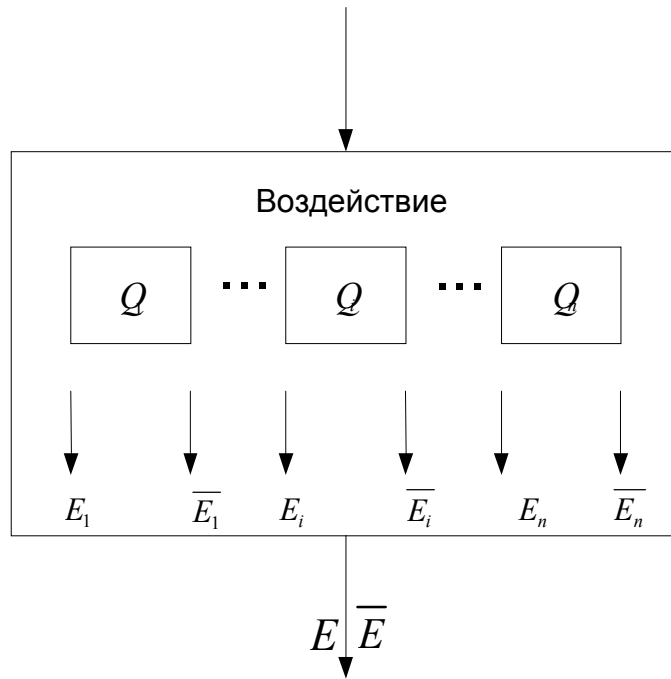


Рис.10.5. Схема событий в системе «человек-машина-среда» [16].

На практике пользуются формулой объективной вероятности

$$P\{E\} = n_E/n, \quad (10.8)$$

где  $n$  и  $n_E$  – общее число случаев и число случаев, при которых наступает событие  $E$ .

Вероятность события  $E_1$  при условии  $E_2$  обозначают  $P\{E_1|E_2\}$ .

Если события  $E_1$  и  $E_2$  независимые, т.е. если  $P\{E_1|E_2\} = P\{E_1\}$  и  $P\{E_2|E_1\} = P\{E_2\}$ , то

$$P\{E_1 E_2\} = P\{E_1\} \cdot P\{E_2\}. \quad (10.9)$$

При  $n$  независимых событиях  $E, E, \dots, E_n$  получим

$$P\{\prod_{i=1, n} E_i\} = \prod_{i=1}^n P\{E_i\}. \quad (10.10)$$

Для компонентов системы и системы в целом

$$p_i = P\{E_i\}; \quad (10.11)$$

$$q = P\{-E_i\} = 1 - p_i; \quad (10.12)$$

$$p = P\{E\}; \quad (10.13)$$

$$q = P\{-E\} = 1 - p. \quad (10.14)$$

Логическая функция системы имеет вид

$$E = F(E_1, E_2, \dots, E_n). \quad (10.15)$$

Применяя правила теории вероятностей, находят вероятность нежелательного события в виде функции опасности

$$p = F_p(p_1, p_2, \dots, p_n). \quad (10.16)$$

Подсистемой «ИЛИ» называют часть системы, компоненты которой соединены последовательно (рис.10.6). К нежелательному событию в такой подсистеме приводит отказ любого компонента подсистемы. Если  $E_j$  есть отказ  $j$ -го компонента, то отказ подсистемы «ИЛИ» есть событие:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum E_j, \quad (10.17)$$

$j=1,m$

где  $m$  – число компонентов.

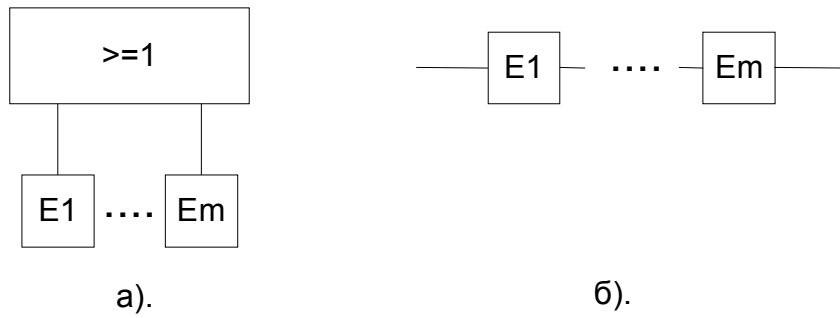


Рис. 10.6. Символ подсистемы «ИЛИ» [16]

Если отказы компонентов взаимно независимы, то вероятность отказа в подсистеме «ИЛИ»:

$$P\{\sum_{j=1,m} E_j\} = 1 - P\{\prod_{j=1,m} (-E_j)\} = 1 - \prod_{j=1,m} (1 - P\{E_j\}). \quad (10.18)$$

Для равновозможных отказов вероятность отказа в этой подсистеме:

$$P\{E\} = 1 - (1 - p)^m. \quad (10.20)$$

Это выражение свидетельствует о высокой вероятности отказа в случае сложных систем. Например, при вероятности отказа компонента  $p=0,1$  подсистема «ИЛИ», состоящая из 10 компонентов ( $m = 10$ ), имеет вероятность того, что отказа в подсистеме не произойдет, равную

$$(1 - p)^m = 1 - P\{E\} = (1 - 0,1)^{10} \approx 0,35.$$

Подсистемой «И» называют ту часть системы, компоненты которой соединены параллельно (рис. 10.7). К отказу такой подсистемы приводит отказ всех ее компонентов:

$$E = E_1 * E_2 * \dots * E_m = \prod_{j=1,m} E_j. \quad (10.21)$$

Если отказы компонентов можно считать взаимно независимыми, то вероятность отказа в подсистеме «И»

$$P\{E\} = \prod_{j=1}^m P\{E_j\}. \quad (10.22)$$

На практике подсистемой «И» является операция резервирования, которую применяют, когда необходимо достичь высокой надежности системы, если имеется опасность аварии.

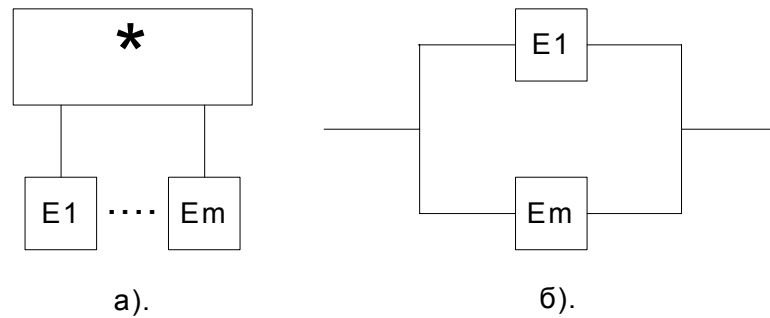


Рис. 10.7. Символ подсистемы «И» [16]

Итогом анализа опасностей на этом этапе являются следующие выводы:

1) Любые действия персонала, операции, устройства, которые с точки зрения безопасности выполняют одни и те же функции в системе, могут считаться соединенными параллельно.

2) Любые действия персонала, операции, устройства, каждое из которых необходимо для предотвращения нежелательного события (аварии, несчастного случая), должны рассматриваться как соединенные последовательно.

3) Для уменьшения опасности системы необходимо предусмотреть резервирование, учитывая при этом экономические затраты.

Подсистемой «И – ИЛИ» называют ту часть системы, которая соединяет подсистемы «ИЛИ» в подсистему «И» (рис. 10.8).

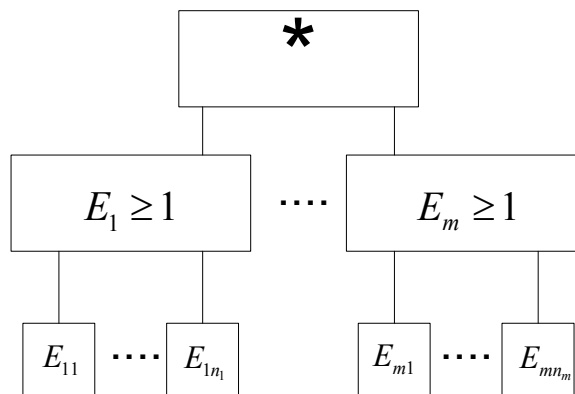


Рис. 10.8. Символ подсистемы «И-ИЛИ» [16]

Параллельно соединенные компоненты  $E_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), образующие подсистему «И», представляют собой подсистемы «ИЛИ», состоящие из последовательно соединенных компонентов  $E_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Вероятность отказа  $i$ -й подсистемы «ИЛИ»:

$$P\{E_i\} = 1 - \prod_{j=1, n} (1 - P\{E_{ij}\}). \quad (10.23)$$

С учетом соотношения для вероятности подсистемы «И» находим вероятность отказа подсистемы «И - ИЛИ»:

$$P\{E\} = \prod_{i=1}^m [1 - \prod_{j=1}^n (1 - E_{ij})]. \quad (10.24)$$

Подсистемой «ИЛИ – И» в системе называют подсистемы «И», соединенные в подсистему «ИЛИ» (рис. 10.9).

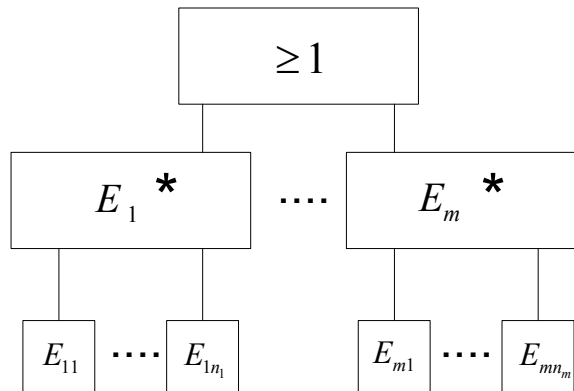


Рис. 10.9. Символ подсистемы «ИЛИ-И» [16]

Последовательно соединенные компоненты  $E_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), образующие подсистему «ИЛИ», представляют собой подсистемы «И» из параллельно соединенных компонентов  $E_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Вероятность отказа  $i$ -й подсистемы «И»:

$$P\{E_i\} = \prod_{j=1}^n P\{E_{ij}\}. \quad (10.25)$$

Используя соотношение для вероятности подсистемы «ИЛИ», находим вероятность отказа подсистемы «ИЛИ – И»:

$$P\{E\} = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - \prod_{j=1}^n P\{E_{ij}\}]. \quad (10.26)$$

Общепринятой “шкалой” для количественного измерения опасностей является “шкала”, в которой в качестве измерения используются единицы риска. При этом под термином “риск” понимают векторную, т.е. многокомпонентную величину, которая характеризуется ущербом от воздействия того или иного опасного фактора, вероятностью возникновения рассматриваемого фактора и неопределённостью в величинах как ущерба, так и вероятности. Векторы, как правило, неравномерно распределены в пространстве и времени.

Под термином “ущерб” понимаются фактические и возможные экономические потери и (или) ухудшение природной среды вследствие изменений в окружающей человека среде.

Вероятность возникновения опасности – величина, существенно меньшая единицы. Кроме того, точки реализации опасности распределены в пространстве и времени. Это значит, что, например, вероятность взрыва одной АЭС в стране гораздо выше, чем вероятность одновременного взрыва всех электростанций страны за одного и то же время. Или вероятность пяти подряд неурожайных лет гораздо ниже одного неурожайного года. Становится ясным: чем больший отрезок времени и количество рискующих субъектов мы возьмем, тем определеннее станет величина ущерба, который субъекты получают в совокупности за этот отрезок времени.

В терминах риска принято описывать и опасности от достоверных событий, происходящих с вероятностью, равной единице. Таким примером в нашей проблеме является загрязнение окружающей среды отходами конкретным предприятием. В этом случае “риск” эквивалентен ущербу и, соответственно, величина риска равна величине ущерба.



Итак, количественная оценка риска представляет собой процесс оценки численных значений вероятности и последствий нежелательных процессов, явлений, событий, а, стало быть, к достоверности получаемых оценок надо подходить осторожно.

Для численной оценки риска используют различные математические формулировки.

Обычно при оценке риска его характеризуют двумя величинами – вероятностью события  $P$  и последствиями  $X$ , которые в выражении математического ожидания выступают как сомножители:

$$R = P \cdot X. \quad (10.27)$$

По отношению к источникам опасностей оценка риска предусматривает разграничение нормального режима работы  $R_n$  и аварийных ситуаций  $R_{ав}$ :

$$R = R_n + R_{ав} = P_n \cdot X_n + P_{ав} \cdot X_{ав}. \quad (10.28)$$

В случае, когда последствия неизвестны, то под риском понимают вероятность наступления определенного сочетания нежелательных событий:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (10.29)$$

При необходимости можно использовать определение риска как вероятности превышения предела  $x$ :

$$R = P\{\xi > x\}, \quad (10.30)$$

где  $\xi$  - случайная величина.

Техногенный риск оценивают по формуле, включающей как вероятность нежелательного события, так и величину последствий в виде ущерба  $U$ :

$$R = P \cdot U. \quad (10.31)$$

Если каждому нежелательному событию, происходящему с вероятностью  $P_i$ , соответствует ущерб  $U_i$ , то величина риска будет представлять собой ожидаемую величину ущерба  $U_*$ :

$$R = U_* = \sum_{i=1}^n P_i \cdot U_i. \quad (10.32)$$

Если все вероятности наступления нежелательного события одинаковы ( $P_i = P$ ,  $i = 1, n$ ), то следует

$$R = P \sum_{i=1}^n U_i. \quad (10.33)$$

Когда существует опасность здоровью и материальным ценностям, риск целесообразно представлять в векторном виде с различными единицами измерения по координатным осям:

$$\vec{R} = \vec{U} \cdot P. \quad (10.34)$$

Перемножение в правой части этого уравнения производится покомпонентно, что позволяет сравнивать риски.

Индивидуальный риск можно определить как ожидаемое значение причиняемого ущерба  $U_*$  за интервал времени  $T$  и отнесенное к группе людей численностью  $M$  человек:

$$R = U_*/(M \cdot T). \quad (10.35)$$

Общий риск для группы людей (коллективный риск)

$$R = U_*/T. \quad (10.36)$$

**Пример 10.3.** Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия технической системы, состоящей из 3-х подсистем с независимыми отказами. Вероятности отказов

подсистем:  $P_1 = 10^{-3}$ ,  $P_2 = 10^{-4}$ ,  $P_3 = 10^{-2}$ , ожидаемые ущербы от отказов подсистем  $U_1 = 10 \cdot 10^6$  руб.,  $U_2 = 50 \cdot 10^6$  руб.,  $U_3 = 5 \cdot 10^6$  руб.

Решение:

Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы как ожидаемую величину ущерба:

$$R = U = \sum_{i=1}^3 P_i U_i = P_1 U_1 + P_2 U_2 + P_3 U_3 = 10^{-3} (10 \cdot 10^6) + 10^{-4} (50 \cdot 10^6) + 10^{-2} (5 \cdot 10^6) = 65 \text{ 000 руб.}$$

**Пример 10.4.** Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия технической системы, состоящей из 5-и подсистем с независимыми равновозможными отказами  $P = 10^{-2}$ . Ожидаемые ущербы от отказов подсистем  $U_1 = 5 \cdot 10^6$ ,  $U_2 = 10 \cdot 10^6$ ,  $U_3 = 20 \cdot 10^6$ ,  $U_4 = 15 \cdot 10^6$ ,  $U_5 = 25 \cdot 10^6$ .

Решение:

Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы с равновозможными отказами подсистем как ожидаемую величину ущерба:

$$R = U = P \sum_{i=1}^5 U_i = P (U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5) = 10^{-2} (5 + 10 + 20 + 15 + 25) 10^6 = 750 \text{ 000 руб.}$$

Рекомендации по выбору методов анализа риска для различных видов деятельности и этапов функционирования опасного производственного объекта представлены в табл. 10.2.

В табл. 10.2 приняты следующие обозначения:

0 — наименее подходящий метод анализа;

+ — рекомендуемый метод;

++ — наиболее подходящий метод.

Методы могут применяться изолированно или в дополнение друг к другу, причем методы качественного анализа могут включать количественные критерии риска (в основном, по экспертным оценкам с использованием, например, матрицы «вероятность-тяжесть последствий» ранжирования опасности). По возможности полный количественный анализ риска должен использовать результаты качественного анализа опасностей.

Таблица 10.2

Рекомендации по выбору методов анализа риска

Метод	Вид деятельности				
	Размещение (предпроектные работы)	Проектирование	Ввод или вывод из эксплуатации	Эксплуатация	Реконструкция
Анализ опасности и работоспособности	0	++	+	+	++
Анализ видов и последствий отказов	0	++	+	+	++
Анализ «деревьев отказов и событий»	0	++	+	+	++
Количественный анализ риска	++	++	0	+	++

## 10.5. Критерии приемлемого риска

Взаимодействие человека с природой, так называемое антропогенное давление на окружающую среду, многократно усилившееся с развитием научно-технического прогресса, привело к тому, что одной из глобальных проблем настоящего времени стала проблема экологической безопасности человека. Сейчас как никогда актуален вопрос: каким образом предотвратить или свести к минимуму тяжелые последствия чрезвычайных ситуаций, обусловленных авариями, загрязнением и разрушением биосферы, стихийными бедствиями.

Концепция абсолютной безопасности недавнего времени была фундаментом, на котором строились нормативы безопасности во всем мире. Для предотвращения аварий внедрялись дополнительные технические устройства – инженерные системы безопасности, принимались организационные меры, обеспечивающие высокий уровень дисциплины, строгий регламент работы. Считалось, что такой инженерный, детерминистский подход позволяет исключить любую опасность для населения и окружающей среды.

До последнего десятилетия этот подход был оправдан. Однако сегодня из-за беспрецедентного усложнения производств и появления принципиально новых технологий, возросшей сети транспортных и энергетических коммуникаций, концепция абсолютной безопасности стала неадекватна внутренним законам техносферы и биосферы.

Любая деятельность человека, направленная на создание материальных благ, сопровождается использованием энергии, взаимодействием его со сложными техническими системами, а состояние его защиты и окружающей среды оценивается не показателями, характеризующими состояние здоровья и качество окружающей среды, а надежностью и эффективностью технических систем безопасности, и, следовательно, носит чисто отраслевой, инженерный характер. К тому же ресурсы любого общества ограничены. Если продолжать вкладывать все больше и больше средств в технические системы предотвращения аварий, то будем вынуждены урезать финансирование социальных программ, чем сократим среднюю продолжительность жизни человека и снизим её качество.

Поэтому человеческое сообщество пришло к пониманию невозможности создания “абсолютной безопасности” реальной действительности, и следует стремиться к достижению такого уровня риска от опасных факторов, который можно рассматривать как “приемлемый”. Его приемлемость должна быть обоснована исходя из экономических и социальных соображений. Это означает, что уровень риска от факторов опасности, обусловленных хозяйственной деятельностью, является “приемлемым”, если его величина (вероятность реализации или возможный ущерб) настолько незначительна, что ради получаемой при этом выгоды в виде материальных и социальных благ, человек или общество в целом готово пойти на риск.

Особую роль для общества играет установление приемлемого риска. В зарубежной практике при решении производственных задач считается приемлемым значение индивидуального риска  $1 \cdot 10^{-8}$ . Индивидуальный риск выше  $1 \cdot 10^{-6}$  – неприемлем. Однако эти значения – отправные данные для обоснования пороговых значений риска. Норматива допустимого социального риска не существует. Косвенно социальный риск определяется опасностью производственных объектов (предприятий). Оценка опасности объектов предполагает анализ опасных факторов производства, установление численных значений вероятности возникновения опасных ситуаций, анализ их развития и прогноз возможного числа погибших людей.

Принятие риска в качестве одного из показателей безопасности ставит несколько важных задач нормирования, таких как обоснование критериальных значений риска, контроля риска, способы верификации расчетных методик.

Среди подходов, предложенных для обоснования критериальных значений риска следует отметить метод экономического анализа безопасности, основанный на учете затрат на обеспечение безопасности и потерь от возможных аварий. Концепция нормирования безопасности предлагает задание риска следующим образом:

- абсолютная безопасность не может быть обеспечена, объект может быть только относительно безопасен;

- требования к уровню безопасности формируются на основе «приемлемого риска», связаны с социально-экономическим состоянием общества и являются производными этого состояния;

- определение риска осуществляется путем выявления различных факторов, влияющих на безопасность, и их количественной оценки.

Существуют и другие аспекты нормирования безопасности:

- риск не должен превышать уровня, достигнутого для сложных технических объектов с учетом природных воздействий;

- риск должен быть снижен настолько, насколько это практически достижимо в рамках соответствующих ограничений;

- не должно быть составляющих риска, резко превышающих другие (аналог принципа равнонадежности, применяемого при обеспечении надежности изделий).

Поэтому, оценивая приемлемость различных уровней экономического риска на первом этапе, можно ограничиться рассмотрением риска лишь тех вредных последствий, которые, в конечном счете, приводят к смертельным исходам, поскольку для этого показателя достаточно надежные статистические данные. Тогда, например, понятие «экологический риск» может быть сформулировано как отношение величины возможного ущерба, выраженного в числе смертельных исходов от воздействия вредного экологического фактора за определенный интервал времени к нормированной величине интенсивности этого фактора.

Таким образом, главное внимание при определении технического, экологического и социального риска должно быть направлено на анализ соотношения возможного экономического ущерба, вредных социальных и экологических последствий, заканчивающихся смертельными исходами, и количественной оценки как суммарного техногенного, вредного социального и экологического воздействия, так и его компонентов.

Общественная приемлемость риска связана с различными видами деятельности и определяется экономическими, социальными и психологическими факторами.

Приемлемый риск - это такой низкий уровень смертности, травматизма или инвалидности людей, который не влияет на экономические показатели предприятия, отрасли экономики или государства.

В общем случае под приемлемым риском понимается риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из экономических и социальных соображений.

Необходимость формирования концепции приемлемого (допустимого) риска обусловлена невозможностью создания абсолютно безопасной деятельности (технологического процесса).

Экономические возможности повышения безопасности технических систем не безграничны. Так, на производстве, затрачивая чрезмерные средства на повышение безопасности технических систем, можно нанести ущерб социальной сфере производства (сокращение затрат на приобретение спецодежды, медицинское обслуживание и др.).

Пример определения приемлемого риска представлен на рис.10.10.

При увеличении затрат на совершенствование оборудования технический риск снижается, но растет социальный. Суммарный риск имеет минимум при определенном соотношении между инвестициями в техническую и социальную сферу. Это обстоятельство надо учитывать при выборе приемлемого риска. Подход к оценке приемлемого риска очень широк.

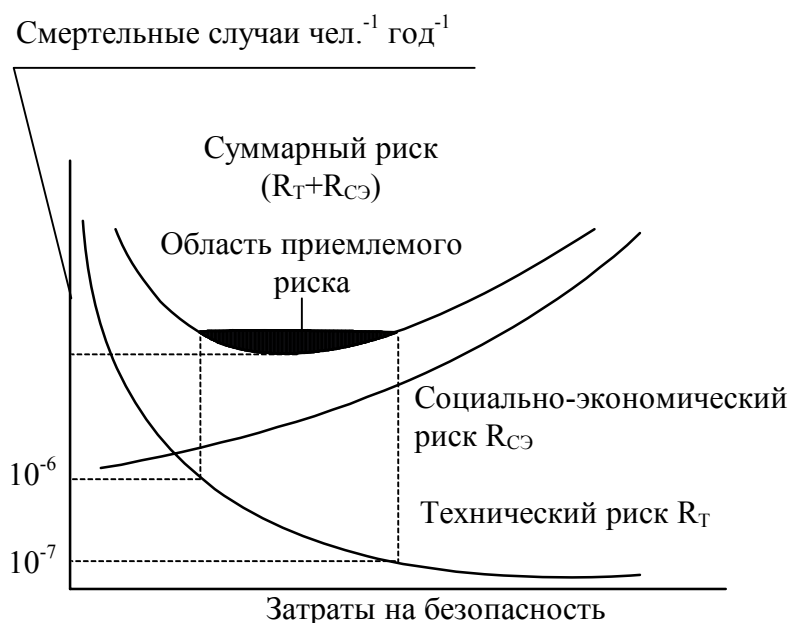


Рис.10.10. Определение приемлемого риска

При определении социально приемлемого риска обычно используют данные о естественной смертности людей.

В качестве реперного значения *абсолютного риска* принимают величину летальных исходов (ЛИ):

$$R_A = 10^{-4} \text{ ЛИ/}(чел\text{год}). \quad (10.37)$$

В качестве реперного значения допустимого (приемлемого) риска при наличии отдельно взятого источника опасности принимают:

$$R_D = 10^{-5} \text{ ЛИ/}(чел\text{год}); \quad (10.38)$$

$$R_D = 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ НС/}(чел\text{год}), \quad (10.39)$$

где НС – случаи нетрудоспособности.

Для населения величина дополнительного риска, вызванного техногенными причинами, не должна превышать реперное значение абсолютного риска:

$$R \leq R_A. \quad (10.40)$$

Для отдельно взятого источника опасности, учитывая, что индивидуальный риск зависит от расстояния  $R = R(r)$ , условие безопасности можно записать в виде:

$$R(r) \leq R_D. \quad (10.41)$$

В настоящее время по международной договоренности принято считать, что действие техногенных опасностей (технический риск) должно находиться в пределах от  $10^{-7} \dots 10^{-6}$  (смертельных случаев чел<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>), а величина  $10^{-6}$  является максимально приемлемым уровнем индивидуального риска. В национальных правилах эта величина используется для оценки пожарной безопасности и радиационной безопасности.

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т.е. можно говорить о снижении индивидуального, технического или экологического риска, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить и каким в результате окажется социальный риск.

В связи со сложностью расчетов показателей риска, недостатком исходных данных (особенно по надежности оборудования, человеческим ошибкам) на практике часто исполь-

зуются методы анализа и критерии приемлемого риска, основанные на результатах экспертных оценок специалистов. В этом случае рассматриваемый объект обычно ранжируется по степени риска на четыре (или больше) группы с высоким, промежуточным, низким или незначительным уровнем риска. При таком подходе высокий уровень риска считается, как правило, неприемлемым, промежуточный требует выполнения программы работ по уменьшению уровня риска, низкий считается приемлемым, а незначительный вообще не рассматривается, как не заслуживающий внимания.

Есть все основания считать, что из всех возможных подходов к объективному определению приемлемого риска техногенных воздействий на человеческое общество в целом или на население какого-либо региона следует выбирать экологический подход, который в качестве объекта опасности рассматривает не только человека, а весь комплекс окружающей его среды. Остальные подходы, особенно социальный, экономический, технический не лишены известного произвола, связанного с внеэкологическими потребностями и интересами общества. Они в той или иной степени компромиссны.

Таким образом, основным требованием к выбору критерия приемлемого риска при проведении анализа риска является не его строгость, а обоснованность и определенность.

## 10.6. Управление риском

В соответствии с концепцией безопасности населения и окружающей среды практическая деятельность в области управления риском должна быть построена так, чтобы общество в целом получало наибольшую доступную сумму природных благ.

Управление риском – это анализ рискованной ситуации, разработка и обоснование управленческого решения, нередко в форме правового акта, направленного на минимизацию риска.

В принципах управления риском заложены стратегические и тактические цели. В стратегических целях выражено стремление к достижению максимально возможного уровня благосостояния общества в целом, а в тактических – стремление к увеличению безопасности населения, продолжительности жизни. В них оговариваются как интересы групп населения, так и каждой личности в защите от чрезмерного риска.

Важнейшим принципом является положение о том, что в управление риском должен быть включен весь совокупный спектр существующих в обществе опасностей, и общий риск от них для любого человека и для общества в целом не может превышать “приемлемый” для него уровень.

И, наконец, политика в области управления риском должна строиться в рамках строгих ограничений на воздействие на технические системы и природные экосистемы, состоящих из требований о не превышении величин воздействий предельно допустимых уровней, предельно допустимых концентраций и предельно допустимых экологических нагрузок на экосистемы.

Схема процесса управления риском представлена на рис.10.11.

Для проведения анализа риска, установления его допустимых пределов в связи с требованиями безопасности и принятия управляющих решений необходимы:

- наличие информационной системы, позволяющей оперативно контролировать существующие источники опасности и состояние объектов возможного поражения;
- сведения о предполагаемых направлениях хозяйственной деятельности, проектах и технических решениях, которые могут влиять на уровень техногенной и экологической безопасности, а также программы для вероятностной оценки связанного с ними риска;
- экспертиза безопасности и сопоставление альтернативных проектов и технологий, являющихся источниками риска;

- разработка технико-экономической стратегии увеличения безопасности и определение оптимальной структуры затрат для управления величиной риска и ее снижения до приемлемого уровня с экономической и экологической точек зрения;
- составление рискологических прогнозов и аналитическое определение уровня риска, при котором прекращается рост числа техногенных и экологических поражений;
- формирование организационных структур, экспертных систем и нормативных документов, предназначенных для выполнения указанных функций и процедуры принятия решений;
- воздействие на общественное мнение и пропаганда научных данных об уровнях техногенного и экологического рисков с целью ориентации на объективные оценки риска.

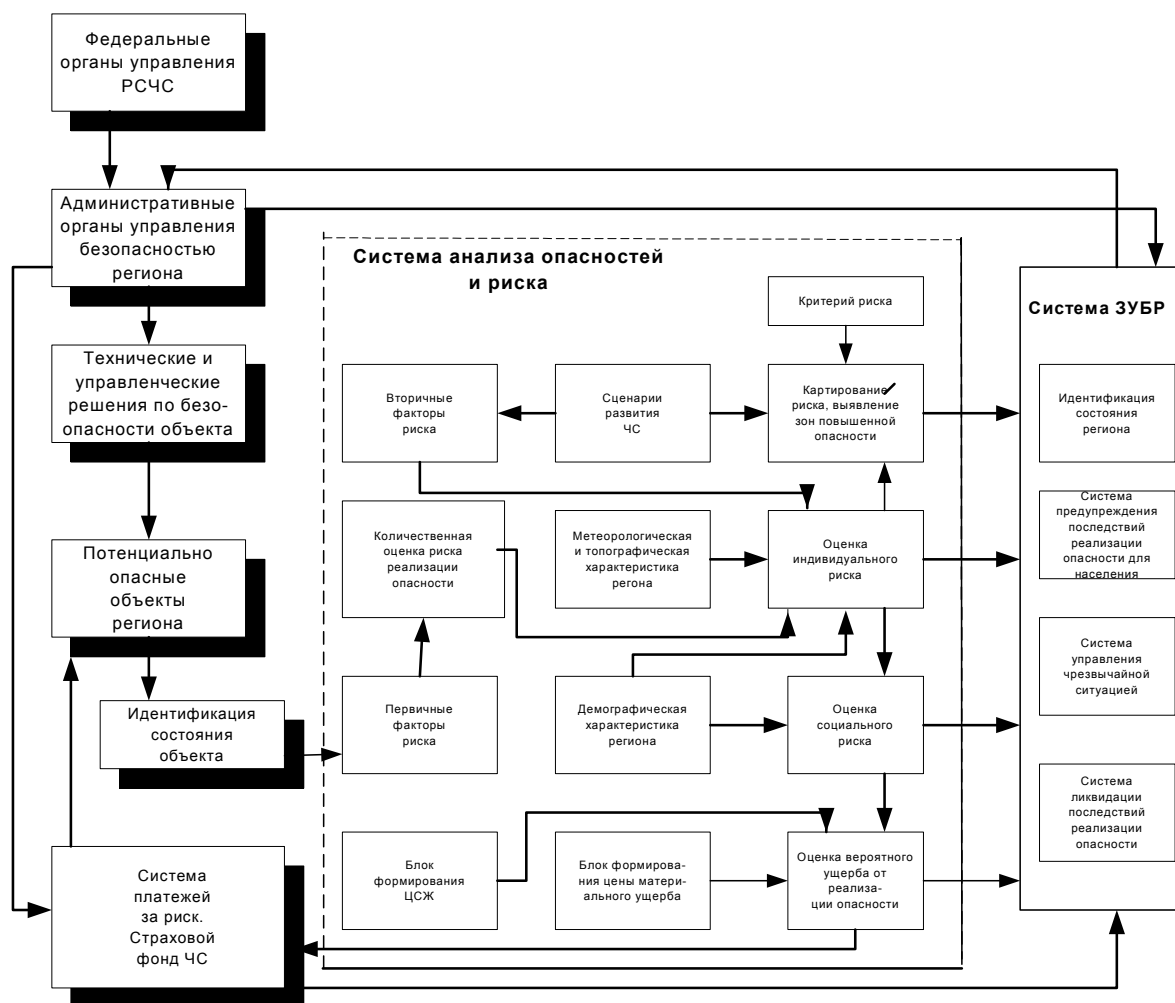


Рис.10.11. Схема управления риском

Модель управления риском состоит из четырех частей и этапов.

*Первый этап* связан с характеристикой риска. На начальном этапе проводится сравнительная характеристика рисков с целью установления приоритетов. На завершающей фазе оценки риска устанавливается степень опасности (вредности).

*Второй этап* – определение приемлемости риска. Риск сопоставляется с рядом социально-экономических факторов:

- выгоды от того или иного вида хозяйственной деятельности;
- потери, обусловленные использованием вида деятельности;

- наличие и возможности регулирующих мер с целью уменьшения негативного влияния на среду и здоровье человека.

Процесс сравнения опирается на метод “затраты – выгоды” (рис. 10.12).

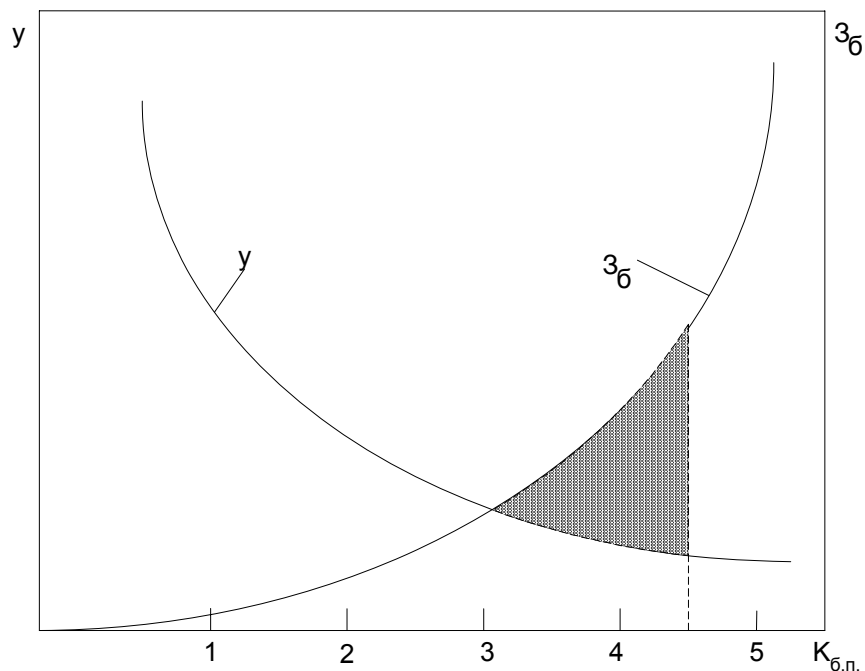


Рис.2.3. Соотношение ущерба и затрат на безопасность: У-ущерб; Зб -затраты на безопасность; К.б.п. - критерий безопасности (заштрихованная площадь - область приемлемых значений У и Зб)

Рис. 10.12. Соотношение ущерба (У) и затрат на безопасность (ЗБ)

В сопоставлении “нерисковых” факторов с “рисковыми” проявляется суть процесса управления риском.

Возможны три варианта принимаемых решений:

- риск приемлем полностью;
- риск приемлем частично;
- риск неприемлем полностью.

В настоящее время уровень пренебрежимого предела риска обычно устанавливают как 1% от максимально допустимого.

В двух последних случаях необходимо установить пропорции контроля, что входит в задачу третьего этапа процедуры управления риском.

*Третий этап* – определение пропорции контроля – заключается в выборе одной из “типовых” мер, способствующей уменьшению (в первом и во втором случае) или устранению (в третьем случае) риска.

*Четвертый этап* – принятие регулирующего решения – определение нормативных актов (законов, постановлений, инструкций) и их положений, соответствующих реализации той “типовой” меры, которая была установлена на предшествующей стадии. Данный элемент, завершая процесс управления риском, одновременно увязывает все его стадии, а также стадии оценки риска в единый процесс принятия решений, в единую концепцию риска.

## 10.7. Применение теории риска в технических системах



Проектирование сложных технических систем и конструкций выполняется на основе численных методов (например, строительной механики) с использованием ЭВМ. Однако вычисленные на основе таких расчетов параметры и характеристики (например, усилия) следует рассматривать как приближенные, которые отличаются от действительных. Отклонения расчетных параметров от действительных представляют собой случайные величины, которые зависят от условий задачи.

Путем применения теории риска можно оценить неточности, возникающие при расчете и проектировании конструкций. Вероятностный метод вычисления риска позволяет получить новую информацию о том, какое влияние на величину риска оказывают разные источники неопределенности в процессе расчета и проектирования конструкции и как это отражается на окончательном проекте.

Однако при использовании численных методов возникают неточности расчета, оценка которых приобретает особое значение при определении вероятного риска.

В инженерных задачах исходные данные часто бывают далеко не полными. Так, например, величина внешних сил изменяется во времени, свойства материала, из которого сделана конструкция, также определяются как средние и имеют разброс, коэффициент надежности может быть определен вероятностным методом. Возникают термины “допустимый предел”, “инженерное решение”, которые подтверждают отсутствие достаточной точности в исходных данных. В результате для описания вероятности разрушения конструкции возникает понятие “риск”, которым характеризуют полученное решение.

В состав крупных сооружений входят объекты, имеющие различную степень ответственности в обеспечении безопасности, например в гидротехническом узле наиболее ответственным объектом является плотина, менее ответственными – здания, трубопроводы и т.д. Однако желательно принимать для всех объектов одинаковую меру риска. Принцип сбалансированного риска требует, чтобы все объекты, входящие в состав сооружения, проектировались на одинаковую степень риска.

При решении многих инженерных задач приходится определять риск, который возникает как результат облегчения той или иной конструкции. Риск определяется на основе обработки статистическими методами большого числа наблюдений. Величина риска зависит от ожидаемой выгоды. Как правило, повышение величины риска приводит к снижению расходов на создание конструкции и увеличению ожидаемой выгоды. Но вместе с тем это повышение может повлечь за собой разрушение конструкций в более короткий срок. Поэтому определение принимаемой величины риска является весьма ответственной задачей, которая может быть правильно решена только путем проведения глубокого статистического анализа.

Функциональная зависимость между величиной риска и ожидаемой выгодой выражается нелинейным законом, как это показано на рис.10.13.

Построенная на этом рисунке кривая делит координатную плоскость на две части. Справа от кривой расположены значения, которые могут быть при известных условиях приняты (эта область заштрихована). Точки, расположенные слева от кривой, относятся к неприемлемым значениям.

Рассмотрим подробнее физический смысл числового выражения риска. Наиболее полные статистические данные имеются для риска, которым характеризуются несчастные случаи в разных областях производства. Так, например, риск, характеризуемый числом  $10^{-3}$  случаев на одного человека в год, является совершенно неприемлемым. Уровень риска  $10^{-4}$  требует принятия мер и может быть принят только в том случае, если другого выхода нет. По данным, приведенным в работах американских ученых, риск в автомобильных авариях достигает уровня  $2,8 \cdot 10^{-4}$ . Уровень риска  $10^{-5}$  соответствует естественным случайным событиям, как, например, несчастным случаям при купании в море, для которых риск исчисляется  $3,7 \cdot 10^{-5}$ . Несчастные случаи, обусловленные риском  $10^{-6}$ , относятся к такому уровню, на ко-

торый имеется более спокойная реакция, так как считается, что избежать этого риска может каждый, соблюдая элементарные правила предосторожности.

Аналогичным образом величина риска может быть установлена и для каждой конструкции с учетом срока службы, ее значения для общей прочности всего сооружения, а также стоимости, срока восстановления и т.д.

Очень часто для оценки риска принимается частота возникновения аварийных ситуаций, например, число случаев разрушения плотин в год и их негативные последствия - число несчастных случаев, которые вызваны этой аварией.

При проектировании принимаются решения, которые могут увеличить или уменьшить величину риска в процессе эксплуатации конструкции. Для того чтобы оценить влияние неточностей, допущенных при проектировании, следует для данной конструкции оценить вероятные пути, в результате которых может произойти разрушение. Для простейшей конструкции очень часто можно предвидеть единственный путь вероятного разрушения и тогда задача упрощается. Однако для сложных конструкций и сооружений разрушение может развиваться разными путями, имеющими присущую им вероятность.

Коэффициент надежности вычисляется для каждой намеченной схемы разрушения по формуле

$$F_{rf} = \prod_{i=1}^n (R_i)^i, \quad (10.42)$$

где  $R_i$  – множитель, характеризующий коэффициент надежности для каждой схемы.

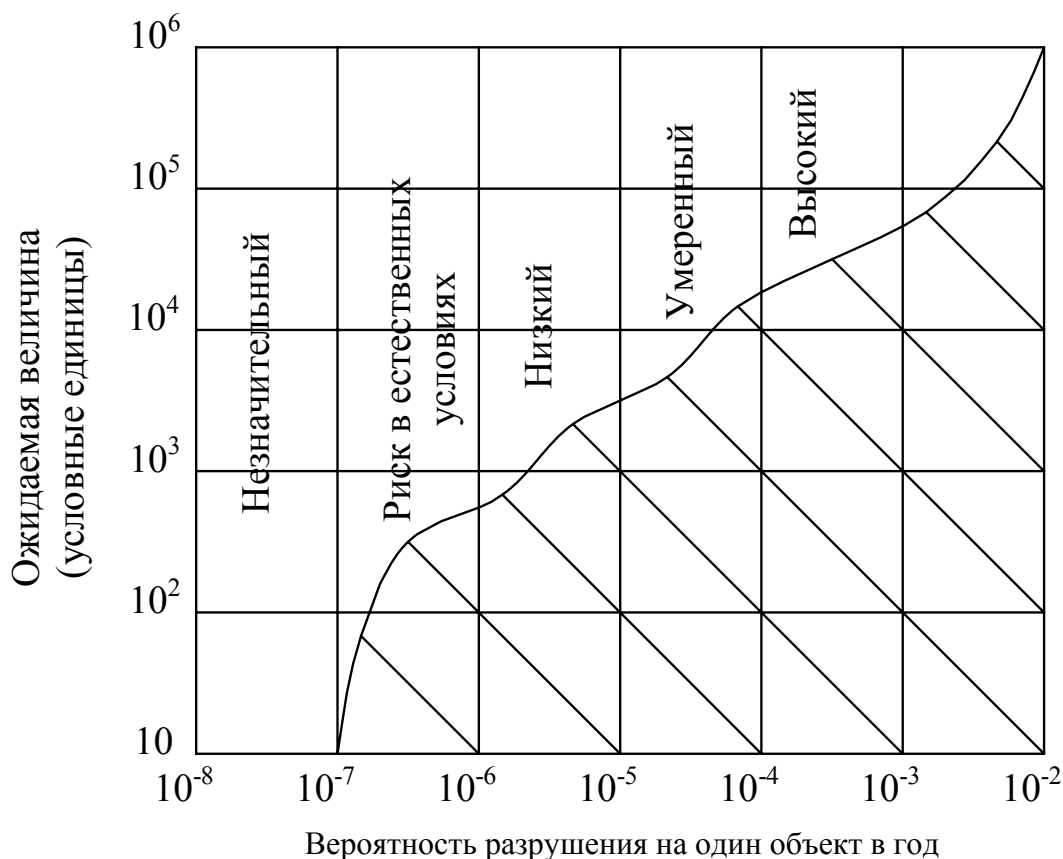


Рис.10.13. Зависимость величины риска от затрат

Зависимость между вероятностью  $P$  разрушения, выраженной в процентах, и коэффициентом надежности  $F$  получается в виде:  $P=10\% - F=3,5$ ;  $P=1\% - F=10$ ;  $P=0.1\% - F=20$ .

Вероятность того, что разрушение произойдет по выбранной последовательности событий  $D$ , вычисляется по формуле

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)^{m_j}, \quad (10.43)$$

где  $m_j$  – число участков для выбранной схемы разрушения.

Величина риска для механических систем, находящихся под воздействием внешних сил и температуры, существенно влияет на условия разрушения конструкций, поэтому необходимо изучить и эти условия. Для того чтобы установить критическое состояние, соответствующее катастрофическому разрушению конструкции, необходимо рассмотреть вызывающие его причины.

Обычно критерием разрушения считают предельную нагрузку или повторяющуюся нагрузку, в результате которой возникает эффект усталости или развитие пластических деформаций. Нередко оба эти критерия объединяются. Для определения вероятности разрушения конструкции в качестве основного показателя принимается ожидаемое число  $N$  повторений нагрузки в течение срока эксплуатации конструкции и вводятся две функции, а именно функция надежности  $L(N)$  и функция риска  $P(N)=[1-L(N)]$ , которые выражают вероятность сохранности или разрушения конструкции в зависимости от условного “возраста” конструкции, характеризуемого числом  $N$ . Таким путем удастся получить решение в указанных выше случаях.

Решая технические задачи, необходимо учитывать риск, возникающий в результате неточностей при выборе исходных данных, принятых в расчетах. При определении допустимого риска необходимо учитывать вероятность благоприятного и неблагоприятного результата в эксплуатационных условиях проектируемого технического объекта. Такой подход позволит принять сознательное окончательное решение при выборе оптимального варианта с учетом риска. Величина риска определяется на основе общих математических методов: теории вероятностей, математической статистики и теории игр. Как правило, риск существует объективно независимо от того, учитывается он в проектах или нет. Для измерения величины риска, соответствующего данному варианту решения, проектировщик должен исследовать влияние отдельных факторов, от которых зависит окончательное решение. Определение риска особое значение приобретает при проектировании новых сооружений и сложных агрегатов и обеспечивает общий технический прогресс. Правильное использование теории риска очень часто приводит к тому, что проектируемый объект может обойтись дешевле и принести дополнительные выгоды.

Очень часто понятие риска связывают с оценкой возможного ущерба. Однако при этом не учитывается возможная выгода, получаемая в результате принятого риска. Поэтому для правильного понимания существа вопроса рекомендуют определять риск как возможность отклонения принятого решения от той величины, которая соответствует условиям эксплуатации объекта.

В специальной литературе рассматривается также очень подробно экономический риск, связанный с планированием промышленного производства. Этот вид риска называют хозяйственным, он включает в определенной степени указанные выше виды риска. Величина хозяйственного риска определяется обычно на основании опыта прошлого путем соответствующей обработки накопленных статистических данных, которые экстраполируются на проектируемый объект. Однако построение логических схем на основе теоретических положений с использованием математических моделей очень часто помогает найти численное выражение для ожидаемого риска.

Стоимость сооружения тесно связана с принятой при проектировании величиной риска. При большом риске снижается стоимость первоначальных затрат на строительство сооружения, однако в дальнейшем при неблагоприятном стечении обстоятельств в сооружении могут возникнуть повреждения, ликвидация которых связана с дополнительными расходами. Ма-

лая величина риска, принятая при проектировании, потребует усиления конструкций, а это повышает стоимость сооружения. Если в процессе дальнейшей эксплуатации сооружения не произойдет неблагоприятного стечения обстоятельств, с расчетом на которые при строительстве выполнялись усиления конструкций для того, чтобы предотвратить повреждение их отдельных элементов, то первоначальное удорожание конструкций за счет их усиления оказывается не нужным. Таким образом, увеличение риска приводит к удешевлению конструкций, а снижение риска вызывает удорожание строительства.

### **10.8. Анализ и оценка риска при декларировании безопасности производственного объекта**

Декларирование промышленной безопасности регламентируется Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 №116-ФЗ.

Декларирование безопасности промышленного объекта, деятельность которого связана с повышенной опасностью производства, осуществляется в целях обеспечения контроля за соблюдением мер безопасности, оценки достаточности и эффективности мероприятий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций на промышленном объекте.

Декларация безопасности – документ, в котором определены возможные характер и масштабы опасностей на промышленном объекте и выработанные меры по обеспечению промышленной безопасности и предупреждению техногенных чрезвычайных ситуаций.

Промышленный объект подлежит обязательному декларированию безопасности в случаях:

- если он включен в список объектов, деятельность которых связана с повышенной опасностью;
- если на нем обращаются опасные вещества в количестве, равном или превышающем определенное пороговое значение (см. таблицу 10.3).

Перечень промышленных объектов, деятельность которых связана с повышенной опасностью, включает:

- гидротехнические сооружения, аварии которых связаны с риском чрезвычайных ситуаций;
- сливо-наливные пункты пожаровзрывоопасных и опасных химических веществ;
- магистральные трубопроводные системы по транспорту нефти, газа, газоконденсата;
- магистральные трубопроводные системы по транспорту аммиака, этилена, пропилена;
- скважины нефтяных, газоконденсатных и газовых месторождений с избыточным давлением 10 МПа и более на устье скважин;
- железнодорожные и сортировочные станции массовой погрузки-выгрузки опасных грузов.

Разработка декларации промышленной безопасности предполагает всестороннюю оценку риска аварии и связанной с ней угрозы; анализ достаточности принятых мер по предупреждению аварий, по обеспечению готовности организации к эксплуатации опасного производственного объекта в соответствии с требованиями промышленной безопасности, а также к локализации и ликвидации последствий аварии на опасном производственном объекте; разработку мероприятий, направленных на снижение масштаба последствий аварии и размера ущерба, нанесенного в случае аварии на опасном производственном объекте.

Декларация безопасности имеет следующие разделы:

1. Общие сведения;
2. Месторасположение объекта;

3. Процессы и технологии;
4. Опасные вещества;
5. Анализ опасностей и риска;
6. Меры обеспечения безопасности;
7. Действия в случае аварии
8. Информирование общественности.

Раздел «Общие сведения» содержат: краткие сведения об объекте; характеристику объекта; обоснование идентификации объекта как подлежащего декларированию безопасности; страховые данные.

Раздел «Месторасположение объекта» содержит описание месторасположения объекта; данные о персонале и проживающем вблизи населении.

Раздел «Процессы и технологии» содержит описание технологии; характеристику основного технологического оборудования; перечень технологических параметров, влияющих на безопасность процесса; характеристику пунктов управления.

Раздел «Опасные вещества» содержит: характеристики опасного вещества; технологические данные по нему.

Раздел «Анализ опасностей и риска» содержит: сведения об известных авариях; определение источников опасностей; анализ условий возникновения и развития аварий и чрезвычайных ситуаций; выводы.

Раздел «Меры обеспечения безопасности» содержит: описание организационных мер обеспечения безопасности; описание технических решений, направленных на обеспечение безопасности; перечень планируемых мероприятий, направленных на повышение безопасности.

Таблица 10.3

*Категории опасных веществ*

Виды опасных веществ	Предельное количество (в тоннах)
Воспламеняющиеся газы	200
Горючие жидкости, находящиеся на товарно-сырьевых складах и базах	50000
Горючие жидкости, используемые в технологическом процессе или транспортируемые по магистральному трубопроводу	200
Токсичные вещества	200
Высокотоксичные вещества	20
Окисляющие вещества	200
Взрывчатые вещества	50
Вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды	200

Раздел «Действия в случае аварии» содержат: оперативную часть плана локализации аварий на объекте; схемы оповещения о возникновении аварий и чрезвычайных ситуаций; описание средств и мероприятий по защите людей; порядок организации медицинского обеспечения.

Раздел «Информирование общественности» содержит: порядок и периодичность взаимодействия с населением и общественными организациями в регионе; порядок представления информации, содержащейся в декларации безопасности.

В качестве приложений к декларации безопасности приводятся: ситуационный план объекта; принципиальная технологическая схема; план размещения основного оборудования; перечень основных нормативных документов, регламентирующих требования по безопасному ведению работ; информационный лист, который может представляться по запросам граждан и общественных организаций.

Декларация безопасности подлежит обновлению не реже одного раза в 5 лет, а также в случаях:

- изменения сведений, входящих в нее и влияющих на обеспечение промышленной безопасности, предупреждение чрезвычайных ситуаций и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций;
- изменения действующих требований (правил и норм) в области промышленной безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций и защиты населения от чрезвычайных ситуаций;
- совместного решения органов МЧС России и Госгортехнадзора России.

### **10.9. Оценка риска аварий**

Порядок разработки декларации безопасности опасных производственных объектов учитывает анализ условий возникновения и развития аварий, который включает:

- выявление возможных причин возникновения и развития аварийных ситуаций с учетом отказов и неполадок оборудования, возможных ошибочных действий персонала, внешних воздействий природного и технического характера;
- определение сценариев возможных аварий;
- оценку количества опасных веществ, способных участвовать в аварии;
- обоснование применяемых для оценки опасностей моделей и методов расчета.

Приведенные данные причин пожаров (табл.10.4) способствуют проведению идентификации опасных и вредных факторов на объектах хранения нефтепродуктов. Можно выделить следующие опасности: взрыв (В), пожар (П), отравление (О) персонала токсическими веществами, загрязнение (З) окружающей природной среды (ОПС). Все эти нежелательные события могут наступать в случае нарушения технологического регламента работ на объектах или отступления от инструкций.

Можно полагать, что в значительной мере указанные опасности будут проявляться совместно, т.е. взрыв будет сопровождаться пожаром, отравлением персонала и загрязнением ОПС (рис.10.14).

В свою очередь, пожар может привести к взрыву и последующему воздействию на персонал и ОПС. Загрязнение среды СНП (бензином и керосином) - в ряде случаев может сопровождаться взрывом и пожаром. В табл.10.5 приведены эти опасности в зависимости от стадии технологического процесса и оборудования.

## Причины пожаров на объектах хранения нефтепродуктов

Причины пожара	Количество пожаров	Процент от общего количества пожаров	Число погибших людей	Процент от общего числа погибших людей
1	2	3	4	5
Установленные поджоги	7	3,10	0	0
Неисправность оборудования	58	25,66	6	31,58
НПУЭ:				
- электрооборудования	17	7,52	3	15,78
- печей	1	0,44	0	0
- теплогенерирующих установок	0	0	0	0
- бытовых газовых устройств	0	0	0	0
НППБ электрогазовых работ	25	11,06	0	0
Взрывы	1	0,44	0	0
Сомовозгорание веществ и материалов	6	2,65	0	0
Неосторожное обращение с огнем	86	38,05	9	47,37
Грозовые разряды	1	0,44	9	0
Неустановленные	6	2,65	1	5,26
Прочие	18	7,96	0	0

Примечание. НПУЭ - нарушение правил устройства и эксплуатации; НППБ - нарушение правил пожарной безопасности.

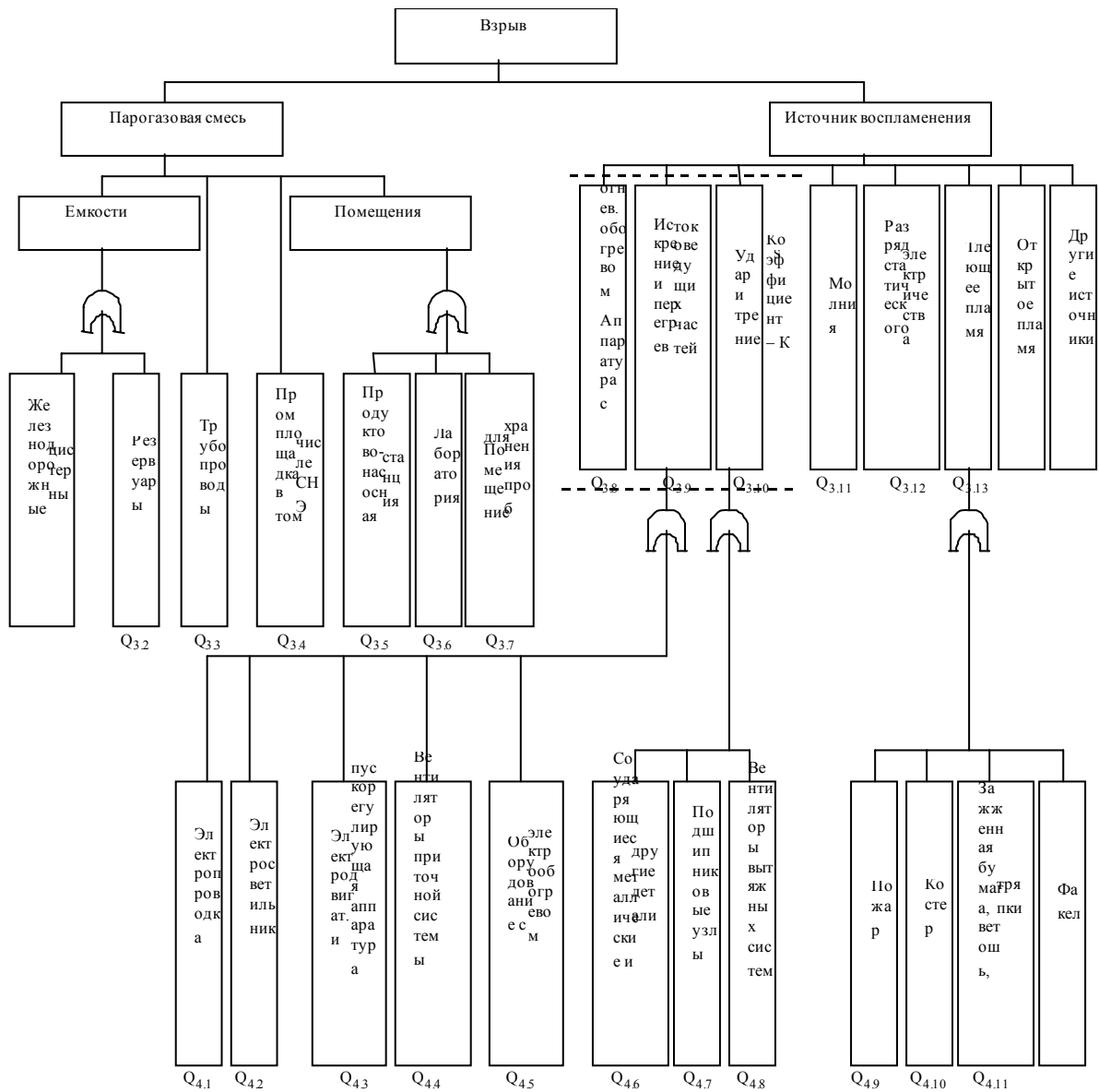


Рис. 10.14. Дерево опасности «Взрыв»

Для анализа риска применительно к опасным факторам «Взрыв» и «Пожар» использовали данные о 226 пожарах на складах ЛВЖ и ГЖ, имевших в качестве источника загорания ЛВЖ. Эти пожары сопровождалась гибелью 19 человек. Отсюда можно в первом приближении определить, что человеческая жизнь приходилась на 12 пожаров. Считая, что вероятность взрывов и пожаров с участием бензина равно 0,16, получаем вероятность смертельного травмирования, равную 0,013. Она близка к вероятности смерти человека вследствие сердечно-сосудистых заболеваний.

Для определения вероятности наступления неблагоприятного события, например взрыва  $Q_6$ , надо знать вероятности исходных событий – образования парогазовой смеси  $Q_{2.1}$  и появления источника воспламенения. Для определения вероятности первого исходного события  $Q_{2.1}$  можно использовать данные для показателей, формирующих коэффициент  $K_1$  (частные факторы взрывоопасности), приведенные в табл.10.6.



## Опасности технологического процесса и оборудования

Технологическая операция	Функциональный блок (сооружение, оборудование, помещение)					
	СНЭ	ПНС	ТТ	РП	Л	ПХ
Слив, зачистка, налив (железнодорожные цистерны) Перекачка СНП Хранение СНП Ремонт резервуаров Отбор проб, проведение замеров уровня СНП	В,П,О,З	В,П,О,З	В,П,О,З	В,П,О,З В,О В,П,О	В,П,О	В,П,О,З

Примечание. СНЭ - сливно-наливная эстакада; ПНС - продуктово-насосная станция; ТТ технологический трубопровод (для перекачки СНП); РП - резервуарный парк; Л – лаборатория; ПХ помещения для хранения СНП, отобранных для анализа.

Анализ специфических свойств керосина разных марок и бензинов показал отсутствие у них принципиальных различий. Оба они являются легковоспламеняющимися жидкостями (ЛВЖ), но упругость паров бензина значительно (в среднем на 1 - 2 порядка) выше упругости паров керосина. Поэтому в условиях производства при нормальной температуре в закрытых объемах бензин может образовывать паровоздушные смеси, способные к взрыву от внешних источников, в то время как керосин практически их не образует (табл.10.6).

Коэффициент  $K_1$ , имеющий достаточно высокое значение (0,41), можно связать с вероятностной составляющей, принимая субъективную вероятность образования паровоздушной смеси бензина близкой к 0,4. Что касается керосина, то эта величина в значительной мере зависит от его состава. Для авиационных топлив она приближается к 0,4, а для осветительного керосина может быть принята на порядок ниже, т.е. 0,04.

Статистика пожаров и взрывов свидетельствует о том, что источники воспламенения проявляются достаточно часто. Поэтому на этапе оценки опасности можно принять субъективную вероятность появления источника зажигания (воспламенения)  $Q_{2,2}$  равной 0,4 (такой же, как  $Q_{3,13} = 0,40$ ). В этом случае для модели оценки вероятности взрыва бензина он составит  $0,4 \times 0,4 = 0,16$ . Иначе говоря, один случай из шести может закончиться взрывом. Для осветительного керосина эта величина на порядок меньше (0,016), т.е. только 1 случай из 60 будет сопровождаться взрывом.

Таблица 10.6

## Взрывопожароопасные свойства бензина и керосина

Показатели, формирующие коэффициент $K_1$	Бензин БР-1	Керосин
Диапазон концентрационных пределов воспламенения	0,02	0,02
Нижний концентрационный предел воспламенения	0,13	0,13
Минимальная энергия зажигания	0,09	0,09
Температура среды		

Давление среды (избыточное)	0,01	0,01
Плотность газа (пара) по отношению к плотности воздуха	0	0
Объемное электрическое сопротивление	0,10	0,10
Особо опасные характеристики	0,06	0,06
	0	0

Наиболее значимым является анализ источников воспламенения. Свой вклад вносят аппаратура с огневым обогревом, искрение и перегрев токоведущих систем, удар и трение. Анализ реальных случаев позволил оценить вклад источников воспламенения равный 0,14. Из этой величины 0,12 приходится на искрение и перегрев токоведущих частей. Вероятности проявления других источников воспламенения следующие: атмосферное электричество (молния, грозовые разряды),  $Q_{3.10} = 0,05$ ; разряд статистического электричества,  $Q_{3.11} = 0,09$ ; тлеющее пламя (транспорт),  $Q_{3.12} = 0,02$ ; открытое пламя (неосторожное обращение с огнем),  $Q_{3.13} = 0,40$ ; другие источники,  $Q_{3.14} = 0,10$ . Составляющие вероятности более низкого уровня на данном этапе не анализируются.

Проведенный анализ показал, что потенциальная вероятность аварии на объектах по хранению нефти и нефтепродуктов достаточно высокая. Существенный вклад в эту составляющую вносят ошибки персонала.

Причинами ошибок персонала могут быть рассеянность, привычные ассоциации, низкая бдительность, ошибки альтернативного выбора, неадекватный учет побочных эффектов и неявных условий, малая точность, слабая топографическая, пространственная ориентировка. Важным средством предотвращения аварий в данном случае является четкое соблюдение отраслевых правил, норм и инструкций.

### 10.9. Ионизирующее излучение как источник риска

Ионизирующая радиация при воздействии на организм человека может вызвать два вида эффектов, которые клинической медициной относятся к болезням: детерминированные пороговые эффекты (лучевая болезнь, лучевой дерматит, лучевая катаракта, лучевое бесплодие, аномалии в развитии плода и др.) и стохастические (вероятностные) беспороговые эффекты (злокачественные опухоли, лейкозы, наследственные болезни).

Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) относятся только к ионизирующему излучению. В Нормах учтено, что ионизирующее излучение является одним из множества источников риска для здоровья человека, и что риски, связанные с воздействием излучения, не должны соотноситься только с выгодами от его использования, но их следует сопоставлять и с рисками нерадиационного происхождения.

Для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

- непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);
- запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования);
- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

Ответственность за соблюдение настоящих норм устанавливается в соответствии со статьей 55 Закона Российской Федерации "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения".

Для обоснования расходов на радиационную защиту при реализации принципа оптимизации принимается, что облучение в коллективной эффективной дозе в 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере 1 чел.-года жизни населения. Величина денежного эквивалента потери 1 чел.-года жизни населения устанавливается методическими указаниями федерального органа Госсанэпиднадзора в размере не менее 1 годового душевого национального дохода.

Индивидуальный и коллективный пожизненный риск возникновения стохастических эффектов определяется соответственно:

$$r_{ic} = \int_0^{\infty} p_i(E) \cdot r_E \cdot E dE;$$

$$R = \sum_{i=1}^N r_{ic}, \quad (10.44)$$

где  $r$ ,  $R$  - индивидуальный и коллективный пожизненный риск соответственно;  $E$  - индивидуальная эффективная доза;  $p(E)dE$  - вероятность для  $i$ -го индивидуума получить годовую эффективную дозу от  $E$  до  $E+dE$ ;  $r_e$  - коэффициент пожизненного риска сокращения длительности  $E$  периода полноценной жизни в среднем на 15 лет на один стохастический эффект (от смертельного рака, серьезных наследственных эффектов и несмертельного рака, приведенного по вреду к последствиям от смертельного рака), равный:

а) для производственного облучения:

$$r_e = 5,6 \cdot 10^{-2} \text{ 1/чел.-Зв при } E < 200 \text{ мЗв/год};$$

$$r_e = 1,1 \cdot 10^{-1} \text{ 1/чел.-Зв при } E \geq 200 \text{ мЗв/год};$$

б) для облучения населения:

$$r_e = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/чел.-Зв при } E < 200 \text{ мЗв/год};$$

$$r_e = 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ 1/чел.-Зв при } E \geq 200 \text{ мЗв/год}.$$

Для целей радиационной безопасности при облучении в течение года индивидуальный риск сокращения длительности периода полноценной жизни в результате возникновения тяжелых последствий от детерминированных эффектов консервативно принимается равным:

$$r_{i,d} = P_i [D > D], \quad (10.45)$$

где  $P_i [D > D]$  - вероятность для  $i$ -го индивидуума быть облученным с дозой больше  $D$  при обращении с источником в течение года;  $D$  - пороговая доза для детерминированного эффекта.

Потенциальное облучение коллектива из  $N$  индивидуумов оправдано, если

$$\sum_{i=1}^N (r_{ic} \cdot x \bar{O}_c + r_{i,d} \cdot x \bar{O}_d) \cdot x C_T \leq V - Y - P, \quad (10.46)$$

где  $\bar{O}_c$  - среднее сокращение длительности периода полноценной жизни в результате возникновения стохастических эффектов, равное 15 лет;  $\bar{O}_d$  - среднее сокращение длительности периода полноценной жизни в результате возникновения тяжелых последствий от детерминированных эффектов, равное 45 лет;  $C_T$  - денежный эквивалент потери 1 чел.-года жизни населения;  $V$  - доход от производства;  $Y$  - ущерб от защиты;  $P$  - затраты на основное произ-

водство, кроме ущерба от защиты.

Снижение риска до возможно низкого уровня (оптимизацию) следует осуществлять с учетом двух обстоятельств:

- предел риска регламентирует потенциальное облучение от всех возможных источников излучения. Поэтому для каждого источника излучения при оптимизации устанавливается граница риска;

- при снижении риска потенциального облучения существует минимальный уровень риска, ниже которого риск считается пренебрежимым и дальнейшее снижение риска нецелесообразно.

Предел индивидуального пожизненного риска в условиях нормальной эксплуатации для техногенного облучения в течение года персонала принимается округленно  $1,0 \cdot 10^{-3}$ , а для населения -  $5,0 \cdot 10^{-5}$ .

Уровень пренебрежимого риска разделяет область оптимизации риска и область безусловно приемлемого риска и составляет  $10^{-6}$ .

## Приложения

Таблица П.1

Значения нормальной функции распределения

$$x = (t - M_x)/\sigma; \quad x = u_p = u_{1-\alpha} = u_{1-\beta}$$

	$\Phi^*$	$\Delta$	$x$	$\Phi^*$	$\Delta$	$x$	$\Phi^*$	$\Delta$
0,00	0,5000	40	-0,43	3336	36	-0,86	1949	27
-0,01	4960	40	-0,44	3300	36	-0,87	1922	28
-0,02	4920	40	-0,45	3264	36	-0,88	1894	27
-0,03	4880	40	-0,46	3228	36	-0,89	1867	26
-0,04	4840	39	-0,47	3192	36	-0,90	0,1841	27
-0,05	4801	40	-0,48	3156	36	-0,91	1814	26
-0,06	4761	40	-0,49	3121	36	-0,92	1788	26
-0,07	4721	40	-0,50	0,3085	35	-0,93	1762	26
-0,08	4681	40	-0,51	3050	35	-0,94	1736	25
-0,09	4641	39	-0,52	3015	34	-0,95	1711	26
-0,10	0,4602	40	-0,53	2981	35	-0,96	1685	25
-0,11	4562	40	-0,55	2946	34	-0,97	1660	25
-0,12	4522	39	-0,55	2912	35	-0,98	1635	24
-0,13	4483	40	-0,56	2877	34	-0,99	1611	24
-0,14	4443	39	-0,57	2843	33	-1,00	0,1587	24
-0,15	4404	40	-0,58	2810	34	-1,01	1563	24
-0,16	4364	39	-0,59	2776	33	-1,02	1539	24
-0,17	4325	39	-0,60	0,2743	34	-1,03	1515	23
-0,18	4286	39	-0,61	2709	33	-1,04	1492	23
-0,19	4247	40	-0,62	2676	33	-1,05	1469	23
-0,20	0,4207	39	-0,63	2643	32	-1,06	1446	23
-0,21	4168	39	-0,66	2611	33	-1,07	1423	22
-0,22	4129	39	-0,65	2578	32	-1,08	1401	22
-0,23	4090	38	-0,66	2546	32	-1,09	1379	22
-0,24	4052	39	-0,67	2514	31	-1,10	0,1357	22
-0,25	4013	39	-0,68	2483	32	-1,11	1335	21
-0,26	3974	38	-0,69	2451	31	-1,12	1314	22
-0,27	3936	39	-0,70	0,2420	31	-1,13	1292	21
-0,28	3897	38	-0,71	2389	31	-1,14	1271	20
-0,29	3859	38	-0,72	2358	31	-1,15	1251	21
-0,30	0,3821	38	-0,73	2327	30	-1,16	1230	20
-0,31	3783	38	-0,77	2297	31	-1,17	1210	20
-0,32	3745	38	-0,75	2266	30	-1,18	1190	20
-0,33	3707	38	-0,76	2236	30	-1,19	1170	19
-0,34	3669	37	-0,77	2206	29	-1,20	0,1151	20
-0,35	3632	38	-0,78	2177	29	-1,21	1131	19
-0,36	3594	37	-0,79	2148	29	-1,22	1112	19
-0,37	3557	37	-0,80	0,2119	29	-1,23	1093	18
-0,38	3520	37	-0,81	2090	29	-1,24	1075	19
-0,39	3483	37	-0,82	2061	28	-1,25	1056	18
-0,40	0,3446	37	-0,83	2033	28	-1,26	1038	18
$x$	$\Phi^*$	$\Delta$	$x$	$\Phi^*$	$\Delta$	$x$	$\Phi^*$	$\Delta$

-1,30	0,0968	17	-1,81	0351	7	0,12	5478	39
-1,31	0951	17	-1,82	0344	8	0,13	5517	40
-1,32	0934	16	-1,83	0336	7	0,14	5557	39
-1,33	0918	17	-1,84	0329	7	0,15	5596	40
-1,34	0901	16	-1,85	0322	8	0,16	5636	39
-1,35	0885	16	-1,86	0314	7	0,17	5675	39
-1,36	0869	16	-1,87	0307	6	0,18	5714	39
-1,37	0853	15	-1,88	0301	7	0,19	5753	40
-1,38	0838	15	-1,89	0294	6	0,20	0,5793	39
-1,39	0823	15	-1,90	0,0288	7	0,21	5832	39
-1,40	0,0808	15	-1,91	0281	7	0,22	5871	39
-1,41	0793	15	-1,92	0274	6	0,23	5910	38
-1,42	0778	14	-1,93	0268	6	0,24	5948	39
-1,43	0764	15	-1,94	0262	6	0,25	5987	39
-1,44	0749	14	-1,95	0256	6	0,26	6026	38
-1,45	0735	14	-1,96	0250	6	0,27	6064	39
-1,46	0721	13	-1,97	0244	5	0,28	6103	38
-1,47	0708	14	-1,98	0239	6	0,29	6141	38
-1,48	0694	13	-1,99	0233	5	0,30	0,6179	38
-1,49	0681	13	-2,00	0,0228	49	0,31	6217	38
-1,50	0,0668	13	-2,10	0179	40	0,32	6255	38
-1,51	0655	12	-2,20	0139	32	0,33	6293	38
-1,52	0643	13	-2,30	0107	25	0,34	6331	37
-1,53	0630	12	-2,40	0082	20	0,35	6368	38
-1,54	0618	12	-2,50	0062	15	0,36	6406	37
-1,55	0606	12	-2,60	0047	12	0,37	6443	37
-1,56	0594	12	-2,70	0035	9	0,38	6480	37
-1,57	0582	11	-2,80	0026	7	0,39	6517	37
-1,58	0571	12	-2,90	0019	5	0,40	0,6554	37
-1,59	0559	11	-3,00	0,0014	4	0,41	6591	37
-1,60	0,0548	11	-3,10	0010	3	0,42	6628	36
-1,61	0537	11	-3,20	0007	2	0,43	6664	36
-1,62	0526	10	-3,30	0005	2	0,44	6700	36
-1,63	0516	11	-3,40	0003	1	0,45	6736	36
-1,64	0505	10	-3,50	0002	0	0,46	6772	36
-1,65	0495	10	-3,60	0002	1	0,47	6808	36
-1,66	0485	10	-3,70	0001	0	0,48	6844	35
-1,67	0475	10	-3,80	0001	1	0,49	6879	36
-1,68	0465	10	-3,90	0000		0,50	0,6915	35
-1,69	0455	9	0,00	0,5000	40	0,51	6950	35
-1,70	0,0466	10	0,01	5040	40	0,52	6985	34
-1,71	0436	9	0,02	5080	40	0,53	7019	35
-1,72	0427	9	0,03	5120	40	0,54	7054	34
-1,73	0418	9	0,04	5160	39	0,55	7088	35
-1,74	0409	8	0,05	5199	40	0,56	7123	34
-1,75	0401	9	0,06	5239	40	0,57	7157	33
-1,76	0392	8	0,07	5279	40	0,58	7190	34
-1,77	0384	9	0,08	5319	40	0,59	7224	33
-1,78	0375	8	0,09	5359	39	0,60	0,7257	34
-1,79	0367	8	0,10	0,5398	40	0,61	7291	33
-1,80	0,0359	8	0,11	5438	40	0,62	7324	33
$x$	$\Phi^*$	$\Delta$	$x$	$\Phi^*$	$\Delta$	$x$	$\Phi^*$	$\Delta$



0,63	7357	32	1,15	8749	21	1,68	9535	13
0,64	7389	33	1,16	8770	20	1,69	9445	13
0,65	7422	32	1,17	8790	20	1,70	0,9554	13
0,66	7454	32	1,18	8810	20	1,71	9564	12
0,67	7486	31	1,19	8830	19	1,72	9573	13
0,68	7517	32	1,20	0,8849	20	1,73	9582	12
0,69	7549	31	1,21	8869	19	1,74	9591	12
0,70	0,7580	31	1,22	8888	19	1,75	9599	12
0,71	7611	31	1,23	8907	18	1,76	9608	12
0,72	7642	31	1,24	8925	19	1,77	9616	11
0,73	7673	30	1,25	8944	18	1,78	9625	12
0,74	7703	31	1,26	8962	18	1,79	9633	11
0,75	7734	30	1,27	8980	17	1,80	0,9641	11
0,76	7764	30	1,28	8997	18	1,81	9649	11
0,77	7794	29	1,29	9015	17	1,82	9656	10
0,78	7823	29	1,30	0,9032	17	1,83	9664	11
0,79	7852	29	1,31	9049	17	1,84	9671	10
0,80	0,7881	29	1,32	9066	16	1,85	9678	10
0,81	7910	29	1,33	9082	17	1,86	9686	10
0,82	7939	28	1,34	9099	16	1,87	9693	10
0,83	7967	28	1,35	9115	16	1,88	9699	10
0,84	7995	28	1,36	9131	16	1,89	9706	9
0,85	8023	28	1,37	9147	15	1,90	0,9713	6
0,86	8051	27	1,38	9162	15	1,91	9719	7
0,87	8078	28	1,39	9177	15	1,92	9726	6
0,88	8106	27	1,40	0,9192	15	1,93	9732	6
0,89	8133	26	1,41	9207	15	1,94	9738	6
0,90	0,8159	27	1,42	9222	14	1,95	9744	6
0,91	8212	26	1,43	9236	15	1,96	9750	6
0,92	8238	26	1,44	9251	14	1,97	9756	5
0,93	8264	25	1,45	9265	14	1,98	9761	6
0,94	8289	26	1,46	9279	13	1,99	9767	5
0,95	8315	25	1,47	9292	14	2,00	0,9772	49
0,96	8340	25	1,48	9306	13	2,10	9821	40
0,97	8365	24	1,49	9319	13	2,20	9861	32
0,98	8389	24	1,50	0,9332	17	2,30	9893	25
0,99	0,8413	24	1,51	9345	17	2,40	9919	20
1,00	8437	24	1,52	9357	16	2,50	9938	15
1,01	8461	24	1,53	9370	17	2,60	9954	12
1,02	8485	23	1,54	9382	16	2,70	9965	9
1,03	8508	23	1,55	9394	16	2,80	9974	7
1,04	8531	23	1,56	9406	16	2,90	9981	5
1,05	8554	23	1,57	9418	15	3,00	0,9986	4
1,06	8577	22	1,58	9429	15	3,10	9990	3
1,07	8599	22	1,59	9441	15	3,20	9993	2
1,08	8621	22	1,60	0,9452	15	3,30	9995	2
1,09	8186	26	1,61	9463	15	3,40	9997	1
1,10	0,8643	22	1,62	9474	14	3,50	9998	0
1,11	8665	21	1,63	9484	15	3,60	9998	1
1,12	8686	22	1,64	9495	14	3,70	9999	0
1,13	8708	21	1,65	9505	14	3,80	9999	1
1,14	8729	20	1,66	9515	13	3,90	1,0000	
			1,67	9525	14			



$x$	$\Phi^*$	$\Delta$	$x$	$\Phi^*$	$\Delta$	$x$	$\Phi^*$	$\Delta$
-----	----------	----------	-----	----------	----------	-----	----------	----------

Таблица П.2

Квантили  $\chi^2$  - квадрат распределения

$$\frac{1}{2^{(r-1)/2} \Gamma\left(\frac{r-1}{2}\right)} \int_0^{\chi_{1-\alpha}^2(r-1)} e^{-\frac{t}{2}} t^{\frac{r-1}{2}-1} dt = 1 - \alpha$$

$m=r-1$	$\alpha$													
	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,000	0,001	0,004	0,016	0,064	0,148	0,455	1,074	1,642	2,71	3,84	5,41	6,64	10,83
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,41	3,22	4,60	5,99	7,82	9,21	13,82
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	9,84	11,34	16,27
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	11,67	13,28	18,46
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	13,39	15,09	20,5
6	0,872	1,134	1,635	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	15,03	16,81	22,5
7	1,239	1,564	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	16,62	18,48	24,3
8	1,646	2,03	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	18,17	20,1	26,1
9	2,09	2,53	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	19,68	21,7	27,9
10	2,56	3,06	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	21,2	23,2	29,6
11	3,05	3,61	4,58	5,58	6,99	8,15	10,34	12,90	14,63	17,28	19,68	22,6	24,7	31,3
12	3,57	4,18	5,23	6,30	7,81	9,03	11,34	14,01	15,81	18,55	21,0	24,1	26,2	32,9
13	4,11	4,76	5,89	7,04	8,63	9,93	12,34	15,12	16,98	19,81	22,4	25,5	27,7	34,6
14	4,66	5,37	6,57	7,79	9,47	10,82	13,34	16,22	18,15	21,1	23,7	26,9	29,1	36,1
15	5,23	5,98	7,26	8,55	10,31	11,72	14,34	17,32	19,31	22,3	25,0	28,3	30,6	37,7
16	5,81	6,61	7,96	9,31	11,15	12,62	15,34	18,42	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0	39,3
17	6,41	7,26	8,67	10,08	12,00	13,53	16,34	19,51	21,6	24,8	27,6	31,0	33,4	40,8
18	7,02	7,91	9,39	10,86	12,86	14,44	17,34	20,6	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8	42,3
19	7,63	8,57	10,11	11,65	13,72	15,35	18,34	21,7	23,9	27,2	30,1	33,7	36,2	43,8
20	8,26	9,24	10,85	12,44	14,58	16,27	19,34	22,8	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6	45,3
21	8,90	9,92	11,59	13,24	15,44	17,18	20,3	23,9	26,2	29,6	32,7	36,3	38,9	46,8
22	9,54	10,60	12,34	14,04	16,31	18,10	21,3	24,9	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3	48,3
23	10,20	11,29	13,09	14,85	17,19	19,02	22,3	26,0	28,4	32,0	35,2	39,0	41,6	49,7
23	10,86	11,99	13,85	15,66	18,06	19,94	23,3	27,1	29,6	33,2	36,4	40,3	43,0	51,2
25	11,52	12,70	14,61	16,47	18,94	20,9	24,3	28,2	30,7	34,4	37,7	41,7	44,3	52,6
26	12,20	13,41	15,38	17,29	19,82	21,8	25,3	29,2	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6	54,1
27	12,88	14,12	16,15	18,11	20,7	22,7	26,3	30,3	32,9	36,7	40,1	44,1	47,0	55,5
28	13,56	14,85	16,93	18,94	21,6	23,6	27,3	31,4	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3	56,9
29	14,26	15,57	17,71	19,77	22,5	24,6	28,3	32,5	35,1	39,1	41,6	46,7	49,6	58,3
30	14,95	16,31	18,49	20,6	23,4	25,5	29,3	33,5	36,2	40,3	43,8	48,0	50,9	59,7

Примечание. При  $m > 30$   $\chi_{\alpha}^2 = 0,5[u_{1-\alpha} \pm (2m - 1)^{1/2}]^2$ ,  $u_{1-\alpha} = u_p$  - квантиль функции нормального распределения, определяемая по табл. П.1 приложения.

*Критерий Колмогорова.*  
*Значения теоретической функции Колмогорова»  $K(y)^*$*

$y$	$K(y)^*$	$y$	$K(y)^*$	$y$	$K(y)^*$	$y$	$K(y)^*$	$y$	$K(y)^*$	$y$	$K(y)^*$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		0,61	0,1492	1,00	0,7300	1,40	0,9603	1,80	0,92693	2,20	0,93874
		0,62	0,1632	1,01	0,7406	1,41	0,9625	1,81	0,92715	2,21	0,93886
		0,63	0,1777	1,02	0,7508	1,42	0,9645	1,82	0,92735	2,22	0,93896
		0,64	0,1927	1,03	0,7608	1,43	0,9665	1,83	0,92753	2,23	0,9404
		0,65	0,2080	1,04	0,7704	1,44	0,9684	1,84	0,92770	2,24	0,9412
		0,66	0,2236	1,05	0,7798	1,45	0,9701	1,85	0,92787	2,25	0,9420
0,28	0,051	0,67	0,2396	1,06	0,7889	1,46	0,9718	1,86	0,92802	2,26	0,9426
0,29	0,054	0,68	0,2558	1,07	0,7976	1,47	0,9734	1,87	0,92814	2,27	0,9434
0,30	0,059	0,69	0,2722	1,08	0,8061	1,48	0,9750	1,88	0,92830	2,28	0,9440
0,31	0,0421	0,70	0,2888	1,09	0,8143	1,49	0,9764	1,89	0,92842	2,29	0,9444
0,32	0,0446	0,71	0,3055	1,10	0,8223	1,50	0,9778	1,90	0,92854	2,30	0,9449
0,33	0,0491	0,72	0,3223	1,11	0,8299	1,51	0,9791	1,91	0,92864	2,31	0,9454
0,34	0,03171	0,73	0,3391	1,12	0,8373	1,52	0,9803	1,92	0,92874	2,32	0,9458
0,35	0,03303	0,74	0,3560	1,13	0,8445	1,53	0,9815	1,93	0,92884	2,33	0,9462
0,36	0,03511	0,75	0,3728	1,14	0,8514	1,54	0,9826	1,94	0,92892	2,34	0,9465
0,37	0,03826	0,76	0,3896	1,15	0,8580	1,55	0,9836	1,95	0,93004	2,35	0,9468
0,38	0,02128	0,77	0,4064	1,16	0,8644	1,56	0,9846	1,96	0,93079	2,36	0,9470
0,39	0,02193	0,78	0,4230	1,17	0,8706	1,57	0,9855	1,97	0,93149	2,37	0,9473
0,40	0,02281	0,79	0,4395	1,18	0,8765	1,58	0,9864	1,98	0,93213	2,38	0,9476
0,41	0,02397	0,80	0,4558	1,19	0,8822	1,59	0,9873	1,99	0,93273	2,39	0,9478
0,42	0,02548	0,81	0,4720	1,20	0,8877	1,60	0,9880	2,00	0,93329	2,40	0,9480
0,43	0,02738	0,82	0,4880	1,21	0,8930	1,61	0,9888	2,01	0,93380	2,41	0,9482
0,44	0,02973	0,83	0,5038	1,22	0,8981	1,62	0,9895	2,02	0,93428	2,42	0,9484
0,45	0,0126	0,84	0,5194	1,23	0,9030	1,63	0,92015	2,03	0,93474	2,43	0,9486
0,46	0,0160	0,85	0,5347	1,24	0,9076	1,64	0,92078	2,04	0,93516	2,44	0,9487
0,47	0,0200	0,86	0,5497	1,25	0,9121	1,65	0,92136	2,05	0,93552	2,45	0,9488
0,48	0,0247	0,87	0,5645	1,26	0,9164	1,66	0,92192	2,06	0,93588	2,46	0,9489
0,49	0,0300	0,88	0,5791	1,27	0,9205	1,67	0,92244	2,07	0,93620	2,47	0,95
0,50	0,0360	0,89	0,5933	1,28	0,9245	1,68	0,92293	2,08	0,93650	2,48	0,951
0,51	0,0428	0,90	0,6073	1,29	0,9283	1,69	0,92339	2,09	0,93680	2,49	0,952
0,52	0,0503	0,91	0,6209	1,30	0,9319	1,70	0,92383	2,10	0,93705	2,50	0,9525
0,53	0,0585	0,92	0,6343	1,31	0,9354	1,71	0,92423	2,11	0,93723	2,55	0,9556
0,54	0,0675	0,93	0,6473	1,32	0,9387	1,72	0,92461	2,12	0,93750	2,60	0,9574
0,55	0,0772	0,94	0,6601	1,33	0,9418	1,73	0,92497	2,13	0,93770	2,65	0,9584
0,56	0,0876	0,95	0,6725	1,34	0,9449	1,74	0,92531	2,14	0,93790	2,70	0,960
0,57	0,0986	0,96	0,6846	1,35	0,9477	1,75	0,92562	2,15	0,93806	2,75	0,964
0,58	0,1104	0,97	0,6964	1,36	0,9505	1,76	0,92592	2,16	0,93822	2,80	0,967
0,59	0,1228	0,98	0,7079	1,37	0,9531	1,77	0,92620	2,17	0,93838	2,85	0,9682
0,60	0,1357	0,99	0,7191	1,38	0,9556	1,78	0,92646	2,18	0,93852	2,90	0,97
				1,39	0,9580	1,79	0,92670	2,19	0,93864	2,95	0,974
										3,00	0,977

*Классификация источников и уровней риска смерти человека  
в промышленно развитых странах*

Источник	Причины	Среднее значение
Внутренняя среда организма человека	Генетические и соматические заболевания, старение	$R_{\text{ср}} = 0,6 \dots 1 \cdot 10^{-2}$
Естественная среда обитания	Несчастный случай от стихийных бедствий (землетрясения, ураганы, наводнения и др.)	$R_{\text{ср}} = 1 \cdot 10^{-6}$ : - наводнения $4 \cdot 10^{-6}$ ; - землетрясения $3 \cdot 10^{-5}$ ; - грозы $6 \cdot 10^{-7}$ ; - ураганы $3 \cdot 10^{-8}$
Техносфера	Несчастные случаи в быту, на транспорте, заболевания от загрязнений окружающей среды	$R_{\text{ср}} = 1 \cdot 10^{-3}$
Профессиональная деятельность	Профессиональные заболевания, несчастные случаи на производстве (при профессиональной деятельности)	Профессиональная деятельность: - безопасная $R_{\text{ср}} < 10^{-4}$ ; - относительно безопасная $R_{\text{ср}} = 10^{-4} \dots 10^{-3}$ ; - опасная $R_{\text{ср}} = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ ; - особо опасная $R_{\text{ср}} > 10^{-2}$
Социальная среда	Самоубийства, самоповреждения, преступные действия, военные действия и т.д.	$R_{\text{ср}} = (0,5 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$

Примечание. ( $R$  – число смертельных случаев чел<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>)

## Сравнение методов анализа риска

Метод	Характеристика	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4
1. Предварительный анализ опасностей (ПАО).	Определяет опасности для системы и выявляет элементы для проведения АПО и построения «дерева отказов». Частично совпадает с методом и анализом критичности.	Является первым необходимым шагом.	Нет
2. Анализ видов и последствий отказов (АПО).	Рассматривает все виды отказов по каждому элементу. Ориентирован на аппаратуру.	Прост для понимания, стандартизован, непротиворечив. Не требует применения математического аппарата.	Рассматривает неопасные отказы, требует много времени, часто не учитывает сочетания отказов и человеческого фактора.
3. Анализ видов, последствий и критичности отказов (АВПКО).	Определяет и классифицирует элементы для усовершенствования систем.	Хорошо стандартизован, прост для пользования и понимания. Не требует применения математического аппарата.	Часто не учитывает эргономику, отказы с общей причиной и взаимодействие систем.
4. Анализ с помощью «дерева отказов».	Начинается с инициирующего события, затем отыскиваются комбинации отказов, которые его вызывают.	Широко применим, эффективен для описания взаимосвязей отказов, ориентирован на отказы: позволяет отыскивать пути развития отказов системы.	Большие «деревья отказов» трудны в понимании, не совпадают с обычными схемами протекания процессов и математически неоднозначны. Метод требует использования сложной логики.

1	2	3	4
5. Анализ с помощью «дерева событий».	Начинается с инициирующих событий, затем рассматриваются альтернативные последовательности событий.	Дает возможность определить основные последовательности и альтернативные результаты отказов.	Не пригоден при параллельной последовательности событий и для детального изучения.
6. Анализ дерева типа «причина-последствие».	Начинается с критического события и развивается с помощью «дерева последствий» в прямой последовательности с помощью «дерева отказов» в обратной последовательности.	Чрезвычайно гибок и насыщен, обеспечен документацией, хорошо демонстрирует последовательные цепи событий.	Диаграммы типа «причина-последствие» вырастают до слишком больших размеров. Обладают многими из недостатков, присущих методам анализа с помощью «дерева отказов».

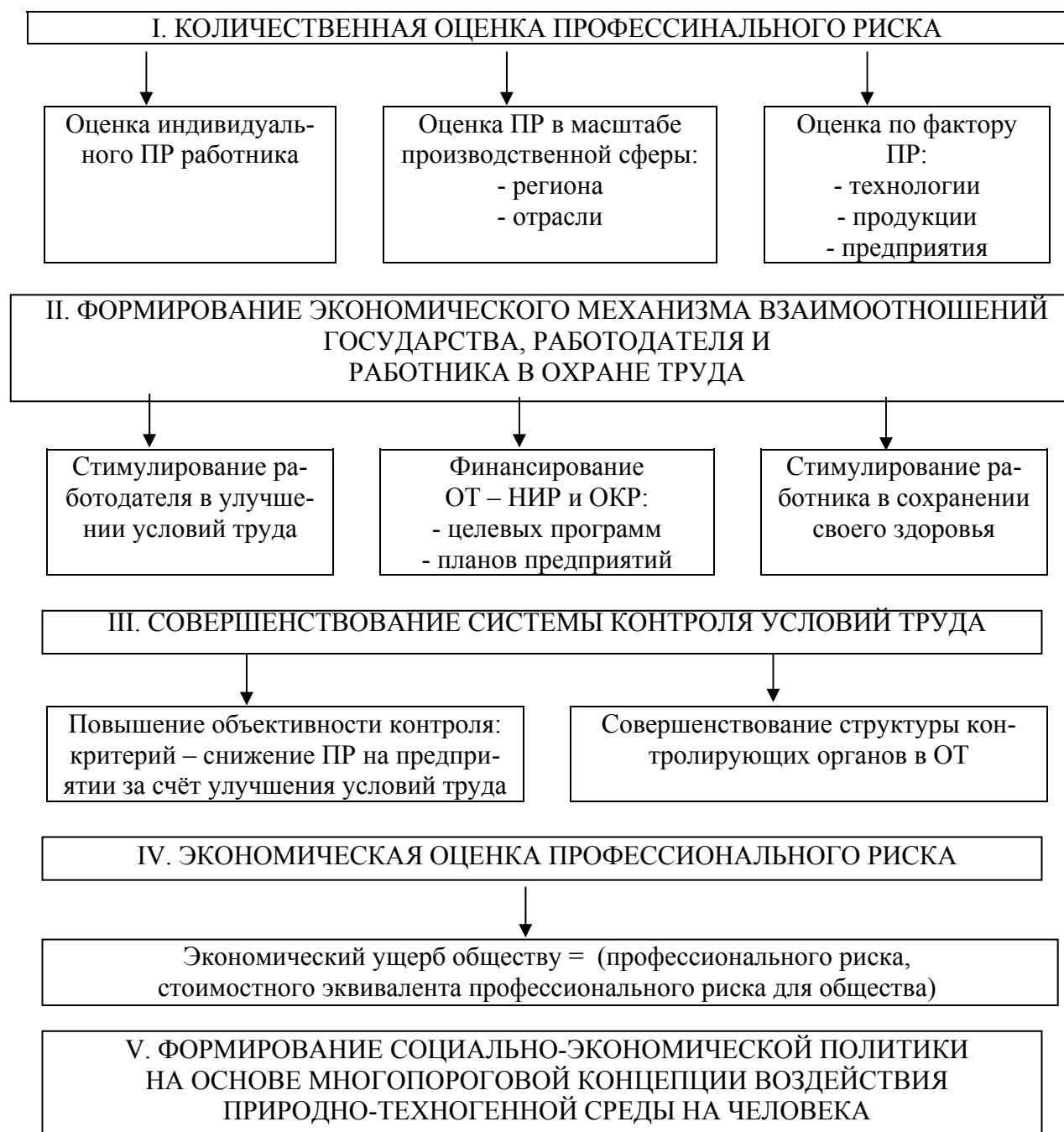
## Показатели риска промышленного изделия

Показатели риска (ПР) и их определения	Обозначения ПР	Классифицирующие факторы	Примечание
1	2	3	4
1. <i>Риск номинальный собственный</i> – вероятность того, что при нормальной работе без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{np}$	$a, p$	
2. <i>Риск номинальный комплексный</i> – вероятность того, что при нормальной работе без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{nc}$	$a, c$	
3. <i>Риск функциональный собственный</i> – вероятность того, что при отказе арматуры в процессе нормальной работы без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{fp}$	$b, p$	
4. <i>Риск функциональный комплексный</i> – вероятность того, что при отказе арматуры в процессе нормальной работы без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{fc}$	$b, c$	
5. <i>Риск аварийный собственный</i> – вероятность того, что при отказе арматуры вследствие чрезвычайных обстоятельств без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{ep}$	$c, p$	
6. <i>Риск аварийный комплексный</i> – вероятность того, что при отказе арматуры вследствие чрезвычайных обстоятельств без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{ec}$	$c, c$	

1	2	3	4
7. <i>Риск дисфункциональный собственный</i> – вероятность того, что при отказе арматуры вследствие неправильного ее применения без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{dp}$	$d, p$	
8. <i>Риск дисфункциональный комплексный</i> – вероятность того, что при отказе арматуры вследствие неправильного ее применения без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{dc}$	$d, c$	



Схема оценки профессионального риска



ЛЕТАЛЬНЫЙ ИСХОД

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ

ПРОИЗВОДСТВЕННО ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ

СКРЫТЫЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ РИСК

ПДК РАБОЧЕЙ ЗОНЫ

ЭКОБУСЛОВЛЕННЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ

СКРЫТЫЙ ЭКОБУСЛОВЛЕННЫЙ РИСК

ПДК ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ЕСТЕСТВЕННЫЙ ФОН

## Литература

1. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г., № 116-ФЗ.
2. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения.
3. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.
4. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.
5. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
6. Хенли Э.Дж., Кумamoto Х. Надежность технических систем и оценка риска. - М.: Машиностроение, 1984.
7. Труханов В.М. Надежность изделий машиностроения. Теория и практика. – М.: Машиностроение, 1996.
8. Проников А.С. Надежность машин. - М.: Машиностроение, 1978.
9. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. - М.: Мир, 1984.
10. В.С.Авдуевский и др. Надежность и эффективность в технике. Справочник. - М.: Машиностроение, 1989.
11. Беляев Ю.К. и др. Надежность технических систем. Справочник. – М.: Радио и связь, 1985.
12. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1990.
13. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1986.
14. Хазов Б.Ф. Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. – М.: Машиностроение, 1986.
15. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. - М.: Наука, 1966.
16. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В.З. Надежность машин. - М.: Высшая школа, 1988.
17. Северцев Н. А. Надежность сложных систем в эксплуатации и обработке. - М.; Высшая школа, 1989.
18. Сеницын А.П. Расчет конструкций на основе теории риска. М.: Стройиздат, 1985.
19. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. М.: Изд-во АСВ, 1998.
20. Безопасность жизнедеятельности./Под ред. С.В.Белова. 3-е изд. - М.: Высшая школа, 2001.
21. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда). /П.П.Кукин, и др. - М.: Высш. шк., 1999.
22. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.
23. СП 12-132-99. Безопасность труда в строительстве. Макеты стандартов предприятий по безопасности труда для организаций строительства, промышленности строительных материалов и жилищно-коммунального хозяйства.
24. Инженерная психология. /Под ред. Б.Ф.Ломова. - М.: Высш. шк., 1986.