



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •  
• МОСКВА • КРАСНОДАР •  
2016





---

А. Г. ВЕТОШКИН

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ В ТЕХНОСФЕРЕ

*Учебное пособие*

Издание второе,  
исправленное и дополненное



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •  
• МОСКВА • КРАСНОДАР •  
2016

**Ветошкин А. Г.****В 39** Обеспечение надежности и безопасности в техносфере: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 236 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).**ISBN 978-5-8114-2055-1**

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 технических систем.

Рассмотрена методология анализа и оценки техногенного риска, приведены основные качественные и количественные методы оценки риска, методология оценки безопасности и риска с использованием логико-графических методов анализа, критерии приемлемого риска, принципы управления риском, рассмотрены примеры использования концепции риска в инженерной практике.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Техносферная безопасность», «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и «Экология и природопользование» (уровень бакалавриата). Может быть использовано при изучении дисциплины, модуля «Безопасность жизнедеятельности», реализуемой в рамках базовой части программы бакалавриата других направлений подготовки высшего образования.

**ББК20.1я73****Рецензенты:**

*К. Р. ТАРАНЦЕВА* — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Биотехнология и техносферная безопасность» Пензенского государственного технологического университета;

*В. С. ДЕМЬЯНОВА* — доктор технических наук, профессор Пензенского государственного университета архитектуры и строительства.

**Обложка***Е. А. ВЛАСОВА*

© Издательство «Лань», 2016

© А. Г. Ветошкин, 2016

© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2016



## ВВЕДЕНИЕ



**С**овременная 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.

По данным Генерального секретаря ООН, за последние 30 лет ущерб, нанесенный техногенными катастрофами, увеличился в три раза и достигает 200 млрд долл. США в год. В России совокупный годовой материальный ущерб от техногенных аварий, включая затраты на их ликвидацию, превышает 40 млрд руб.

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.

В условиях сложившейся в настоящее время в России ситуации проблема техногенной опасности приобретает

особое значение для промышленных районов, где сосредоточен огромный потенциал опасных производств в сочетании со значительным износом основного производственного оборудования и сложной социально-экономической обстановкой.

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 используются и обращаются мощные источники энергии, высокотоксичные и агрессивные вещества.

Государственная политика в области экологической и промышленной безопасности и новые концепции обеспечения безопасности и безаварийности производственных процессов на объектах экономики, диктуемые федеральными законами «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ, «О радиационной безопасности населения» от 09.01.96 г. № 3-ФЗ, «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.99 г. № 52-ФЗ, «Об использовании атомной энергии» от 21.11.95 г. № 170-ФЗ, «Об охране окружающей среды» от 10.01.02 г. № 7-ФЗ, предусматривают в первую очередь объективную оценку опасностей и позволяют наметить пути борьбы с ними.



## ГЛАВА ПЕРВАЯ

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



**О**пасная ситуация возникает при нахождении человека в зоне риска, т. е. в пространстве, где постоянно, периодически или эпизодически возникают опасности, обусловленные опасными или вредными факторами (рис. 1.1).

Опасные ситуации реализуются вследствие совокупности причин, обуславливающих воздействие опасных и (или) вредных факторов на человека, что приводит к по-

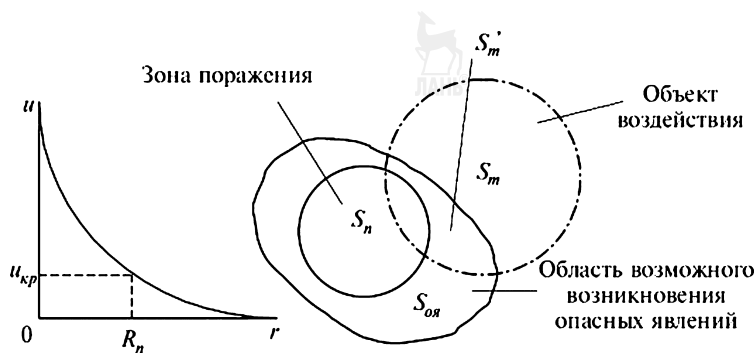


Рис. 1.1

Относительное пространственное распределение источника опасности и объекта воздействия:

$u$  — параметр поражающего действия негативных факторов;  $u_{кр}$  — пороговое значение разрушающего воздействия на объект;  $R_n$  — радиус зоны поражения;  $S_n$ ,  $S_{о.я}$ ,  $S_m$ ,  $S_m'$  — соответственно площадь зоны поражения, зоны опасных явлений, общая площадь территории.

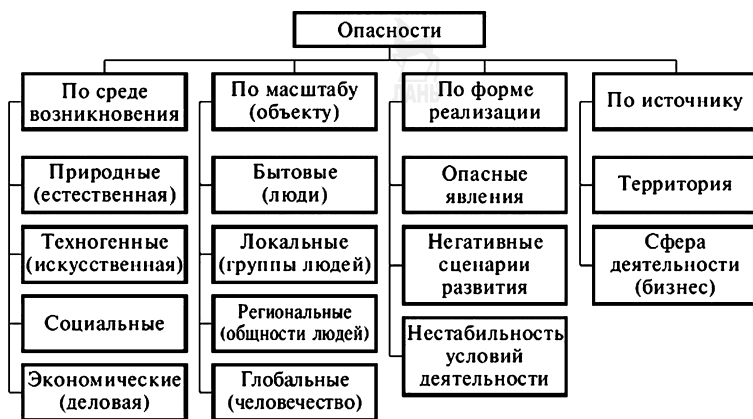


Рис. 1.2  
Виды опасностей

степенному или мгновенному повреждению его здоровья. Классификацию различных видов опасностей можно провести по следующей схеме (рис. 1.2).

*Чрезвычайная ситуация* (ЧС) — это совокупность событий и опасностей, внезапно нарушающих сложившиеся условия жизнедеятельности, создающих угрозу жизни и здоровью людей, среде их обитания, элементам техносферы. *Техногенная чрезвычайная ситуация* (техногенная ЧС) — состояние, при котором в результате возникновения источника техногенной чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде.

Каждую чрезвычайную ситуацию можно рассматривать как крупномасштабную опасную ситуацию, создающую угрозу одновременно большому числу людей и объектам техносферы. Стадии зарождения и развития чрезвычайной ситуации протекают, как правило, скрыто и связаны с накоплением разрушительного потенциала. На кульминационной стадии образуется множество опасных и вред-

ных факторов, объединяемых в один или несколько поражающих факторов.

Чрезвычайные ситуации (ЧС) возникают как при стихийных явлениях природного характера, так и при техногенных авариях.

Возникновение ЧС в промышленных условиях и в быту часто связано с разгерметизацией систем повышенного давления (баллонов и емкостей для хранения или перевозки сжатых, сжиженных и растворенных газов, газо- и водопроводов, систем теплоснабжения и т. п.).

ЧС возникают также в результате нерегламентированного хранения и транспортирования взрывчатых веществ, легковоспламеняющихся жидкостей, химических и радиоактивных веществ, нагретых жидкостей. Следствием этих нарушений являются взрывы, пожары, проливы химически активных жидкостей, выбросы газовых смесей.

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.

Анализ совокупности негативных факторов, действующих в техносфере, показывает, что приоритетное влияние имеют антропогенные негативные воздействия, среди которых преобладают техногенные. Они сформировались в результате преобразующей деятельности человека и изменений в биосферных процессах, обусловленных этой деятельностью.

Под термином «опасность» понимается ситуация в окружающей природной или производственной среде, в которой при определенных условиях возможно возникновение нежелательных событий или процессов (опасных факторов), воздействие которых на окружающую среду и

человека может привести к одному или совокупности из следующих последствий:

- 1) аварии или катастрофы в техносфере;
- 2) ухудшение состояния окружающей среды;
- 3) отклонение здоровья человека от среднестатистического значения.

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 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.

Как естественные, так и техногенные опасности носят потенциальный, т. е. скрытый характер. Количественной мерой опасности является *риск*, т. е. частота реализации опасности. Риск выражает возможную опасность, вероятность нежелательного события.

Таким образом, термин «опасность» описывает возможность осуществления некоторых условий технического, природного и социального характера, при наличии которых могут наступить интересующие нас неблагоприятные события и процессы, например природные катастрофы или бедствия, аварии на промышленных предприятиях, экономические или социальные кризисы. Следовательно, «опасность» — это ситуация, постоянно присутствующая в окружающей среде и способная при определенных условиях привести к реализации в окружающей среде нежелательного события — возникновению опасного фактора. Соответственно реализация опасности — это обычно случайное явление, и возникновение опасного фактора характеризуется вероятностью явления.

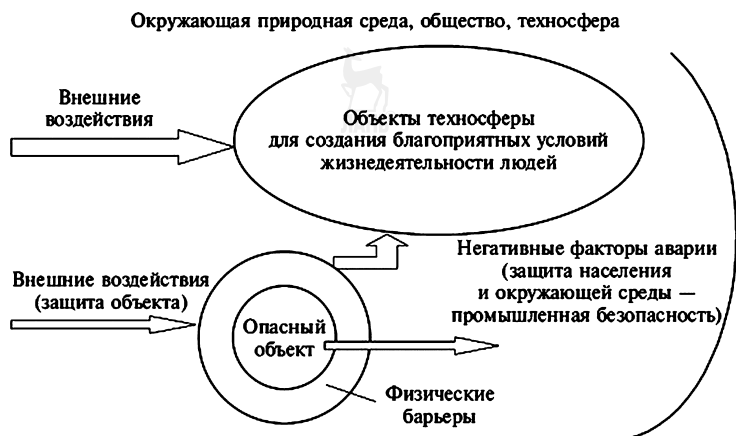
*Безопасность* — состояние защищенности отдельных лиц, общества и природной среды от чрезмерной опаснос-

ти. Можно сказать, что безопасность — состояние действительности, при котором с определенной вероятностью исключено проявление опасности.

В связи с безопасностью человека и окружающей среды возникает проблема безопасности объектов техносферы, появление которых связано со стремлением людей к большей защите от неблагоприятных условий внешней среды и лучшим условиям своей жизнедеятельности. Но эти объекты также необходимо защищать от внешних негативных воздействий. Кроме того, в случае аварий объектов техносферы также формируются негативные факторы. Это особенно относится к проблеме защиты опасных промышленных объектов. В этом случае проблема рассматривается по двум направлениям (рис. 1.3):

- 1) защита объектов от внешних воздействий с целью недопущения их аварии;
- 2) защита людей и окружающей среды от негативных факторов в случае аварии.

Для защиты от воздействия внешних факторов на опасных промышленные объекты и удержания энергии и опасных веществ внутри объекта используется концепция создания барьера, основанная на применении множественности



и эшелонированности защиты. Безопасность промышленного объекта рассматривается в двух аспектах:


1) как свойство объекта не приводить к авариям при внешних негативных воздействиях;

2) как свойство объекта не причинять вреда персоналу, населению и окружающей среде при нормальной эксплуатации и в случае аварийных ситуаций, т. е. безопасность объекта может определяться, как его свойство не причинять вреда при всех условиях эксплуатации.

В качестве единиц измерения безопасности используются показатели, характеризующие состояние здоровья человека и состояние (качество) окружающей среды. Соответственно целью процесса обеспечения безопасности является достижение максимально благоприятных показателей здоровья человека и высокого качества окружающей среды.



---



## ГЛАВА ВТОРАЯ

# ПОНЯТИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**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.

Термины «надежность» и «безопасность», «опасность» и «риск» часто путают, 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 (см. рис. 2.1).

С развитием и усложнением техники углубилась и актуализировалась 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.

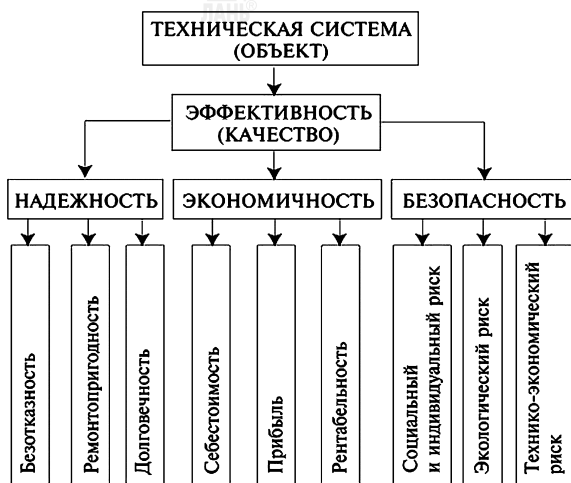


Рис. 2.1

Основные свойства технических систем

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.

Недостаточная надежность объекта приводит к огромным затратам на его ремонт, простоям 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 их партии 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.

*Ремонтпригодность* — 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).

*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:**

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

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

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

г) *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 две группы.

1. Показатели, связанные со сроком службы изделия:

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

б) *средний срок службы* — математическое ожидание срока службы;

в) *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;

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

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

е) *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 исполь-

зовать 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:

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

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

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

г) *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 станов — 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.

---



## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ

### 3.1. 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 *непрерывного* 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*:

$$F(x) = P(X < x). \quad (3.1)$$

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*

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}, \quad (3.2)$$

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:

$$M_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (3.3)$$

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

$$M_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \quad (3.4)$$

Математическое ожидание случайной величины непосредственно связано с ее средним значением. При неограниченном увеличении числа опытов среднее арифметическое значение величины  $x$  приближается к математическому ожиданию и называется *оценкой среднего значения*:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.5)$$

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

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2 p_i. \quad (3.6)$$

Для непрерывной случайной величины дисперсия определяется из выражения

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_x)^2 f(x) dx. \quad (3.7)$$

Оценка дисперсии случайной величины:

$$D_x^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (3.8)$$

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:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (3.9)$$

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

$$v_x = \frac{\sigma_x}{M_x}. \quad (3.10)$$

*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, соответствующий 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 3.1.* 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 3.2.* 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 (3.4):

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

Для определения дисперсии используем формулу (3.7):

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

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 3.3.* При проведении одного опыта может появиться или не появиться некоторое событие  $A$ . Вероятность появления события  $A$  равна  $p$ , а вероятность непоявления 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 (3.3) находим математическое ожидание:

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

Дисперсию величины  $X$  определим по формуле (3.6):

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

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

$$P^*(A) = \frac{m_1}{n_1}. \quad (3.11)$$

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

$$0 \leq P(A) \leq 1. \quad (3.12)$$

*Пример 3.4.* 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 (3.11), найдем вероятность попадания:

$$P(A) = 0,9.$$

Ответ:  $P(A) = 0,9$ .

### 3.2.

#### 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*

$$P(A+B) = P(A) + P(B). \quad (3.13)$$

*Метод полной индукции* позволяет использовать теорему сложения для произвольного числа несовместных

событий. Так, *вероятность суммы нескольких событий равна сумме вероятностей этих событий*:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n). \quad (3.14)$$

Более удобная запись теоремы сложения:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i). \quad (3.15)$$

**Следствие 1.** Если события  $A_1, A_2, \dots, A_n$  образуют полную группу несовместных событий, то сумма их вероятностей равна единице:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1. \quad (3.16)$$

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

**Следствие 2.** Сумма вероятностей противоположных событий равна единице:

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1, \quad (3.17)$$

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

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

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (3.18)$$

Аналогично *вероятность суммы трех совместных событий* определяется выражением (1.19):

$$P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(AB) - P(AC) - P(BC) + P(ABC). \quad (3.19)$$

*Вероятность суммы любого числа совместных событий* определяется выражением

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i A_j A_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 A_2 \dots A_n). \quad (3.20)$$

Формула (3.20) 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*:

$$P(AB) = P(A) + P(B) - P(A + B); \quad (3.21)$$

для произведения трех событий:

$$P(ABC) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A + B) - P(A + C) - P(B + C) + P(A + B + C). \quad (3.22)$$

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

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i + A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i + A_j + A_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 + A_2 + \dots + A_n). \quad (3.23)$$

Формулы (3.20) и (3.23) 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 3.5.* 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.

Решение. 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 (3.14), 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 3.6.* 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  $C = A_1A_2 + B$ , 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.

Решение. В соответствии с формулой (3.18) имеем

$$P(C) = P(A_1A_2) + P(B) - P(A_1A_2B).$$

Используя формулу (3.21), определим

$$P(A_1A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 + A_2).$$

Далее, применяя формулу (3.22), получим

$$P(A_1A_2B) = P(A_1) + P(A_2) + P(B) - P(A_1 + A_2) - P(A_1 + B) - P(A_2 + B) + P(A_1 + A_2 + B).$$

Подставляя полученные выражения и сокращая, находим

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

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

### 3.3.

#### 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 3.7.* 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 3.8.* 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.

$$P(AB) = P(A)P(B/A). \quad (3.24)$$

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:

$$P(A_1A_2\dots A_n) = P(A_1)P(A_2/A_1)P(A_3/A_1A_2)\dots P(A_n/A_1A_2\dots A_{n-1}). \quad (3.25)$$

В случае независимых событий теорема упрощается и принимает вид

$$P(A_1A_2\dots A_n) = P(A_1)P(A_2)\dots P(A_n), \quad (3.26)$$

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

Применяя знак произведения, теорему можно записать так:

$$P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (3.27)$$

*Пример 3.9.* 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

$$A = A_1A_2A_3A_4A_5.$$

По формуле умножения для независимых событий (3.26) получим:

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

*Пример 3.10.* Производят три выстрела по одной и той же мишени. Вероятность попадания при первом-третьем выстрелах соответственно равна:

$$P_1 = 0,8; \quad P_2 = 0,6; \quad P_3 = 0,3.$$

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:

$$B = A_1A_2A_3 + \bar{A}_1A_2\bar{A}_3 + \bar{A}_1\bar{A}_2A_3 + \bar{A}_1A_2A_3 + \\ + A_1\bar{A}_2\bar{A}_3 + A_1\bar{A}_2A_3 + A_1\bar{A}_2A_3,$$

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:

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

### 3.4. 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

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P(A/H_i), \quad (3.28)$$

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

Формулу (3.28) 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 3.11.* 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:

$$\begin{aligned}P(H_0) &= 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 0,03; \\P(H_1) &= 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,2 + \\&+ 0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,8 = 0,22; \\P(H_2) &= 0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,2 + \\&+ 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,8 + 0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 0,47; \\P(H_3) &= 0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 0,28.\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}P(A/H_0) &= 0; \quad P(A/H_1) = 0,3; \\P(A/H_2) &= 0,9; \quad P(A/H_3) = 1,0.\end{aligned}$$

Применяя формулу полной вероятности, получим

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

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:

$$P_m = C_n^m p^m q^{n-m}, \quad (3.29)$$

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

*Пример 3.12.* 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

$$P = m/n = 10/500 = 0,002.$$


Далее по формуле (3.29) 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:  $P_4 \approx 0,000003$ .



---



ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

**ПРИЧИНЫ  
ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

**4.1.  
ИСТОЧНИКИ И ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ  
НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

**Т**е 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 имеются три основных источника воздействий:

- 1) действие энергии окружающей среды, включая человека, исполняющего функции оператора или ремонтника;
- 2) внутренние источники энергии, связанные как с рабочими процессами, протекающими в технической системе, так и с работой отдельных элементов системы;
- 3) 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 и надежность (см. рис. 4.1).

*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.

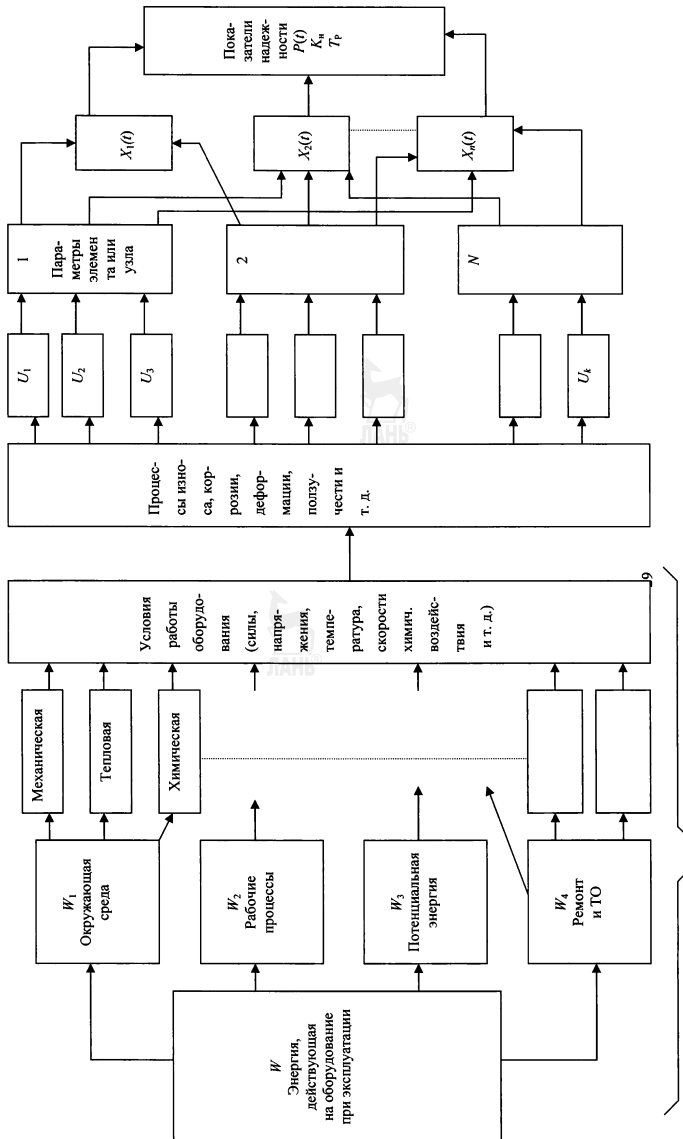


Рис. 4.1  
 Схема формирования показателей работоспособности сложной системы

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.

#### 4.2. 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 сопряжений, 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, изменение 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 по-

вреждения приводит к разрушению элемента конструкции и может закончиться аварией.

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.

### 4.3.

## ФИЗИКА ОТКАЗОВ

### 4.3.1.

#### 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 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:

$$\gamma = \frac{dU}{dt} = \varphi(Z_1, Z_2, \dots, Z_n, t).$$

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.

#### 4.3.2. 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 *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.

#### 4.3.3. 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 находится 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 желательно 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 воз-

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 быстропротекающих 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.

#### 4.4. 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:

1) 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);

2) ошибки эксплуатации и технического обслуживания (неправильная регулировка или калибровка, небрежность оператора, неправильное обращение и т. п.);

3) воздействие окружающей среды (пыль, грязь, температура, вибрация, а также экстремальные режимы нормальной эксплуатации);

4) внешнее катастрофическое воздействие (естественные внешние явления, такие как наводнение, землетрясение, пожар, ураган);

5) 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.);

6) общий внешний источник питания (общий источник питания для основного и резервного оборудования, резервируемых подсистем или элементов);

7) 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 коммутационного 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.



---

## ГЛАВА ПЯТАЯ

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ

### 5.1. 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

$$F(t) = P(\tau < t). \quad (5.1)$$

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*:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (5.2)$$

Следующим показателем надежности является вероятность безотказной работы за заданное время  $t$  или *функция*

надежности, которая является функцией, обратной функции распределения:

$$P(t) = 1 - F(t) = P(\tau > t). \quad (5.3)$$

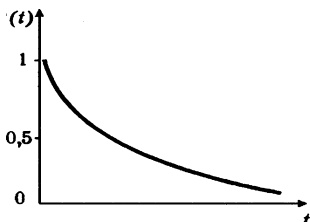


Рис. 5.1  
Кривая функции  
надежности

Графически функция надежности представляет собой монотонно убывающую кривую (рис. 5.1) 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.

$$P(t) = \frac{N - n}{N}, \quad (5.4)$$

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

$$P(t) + F(t) = 1, \quad (5.5)$$

откуда

$$F(t) = 1 - P(t) \quad (5.6)$$

или

$$F(t) = 1 - \frac{n_0}{N}. \quad (5.7)$$

Производная функции (5.4) по времени имеет вид

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\left(\frac{1}{N}\right) \frac{dn}{dt}. \quad (5.8)$$

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

$$\left(\frac{1}{N}\right) \frac{dn}{dt} \rightarrow f(t) \quad \text{или} \quad \frac{dP(t)}{dt} = -f(t). \quad (5.9)$$

Учитывая, что  $P(t) = \frac{n_0}{N}$ , выражение (5.8) можно записать в виде

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{NdP}{dt} = \frac{dn_0(t)}{dt}. \quad (5.10)$$

Разделив обе части соотношения (5.10) на  $n_0(t)$ , получим

$$\left[\frac{1}{n_0(t)}\right] \cdot \frac{dn(t)}{dt} = -\left[\frac{N}{n_0(t)}\right] \cdot \frac{dP(t)}{dt} = \lambda(t), \quad (5.11)$$

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

Подставляя формулу (5.9) в соотношение (5.11), получаем выражение для мгновенного значения интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = -\left[\frac{1}{P(t)}\right] \cdot \frac{dP(t)}{dt} = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (5.12)$$

Вероятность безотказной работы из выражения (5.12) можно представить в виде

$$-\frac{dP(t)}{R(t)} = \lambda(t)dt. \quad (5.13)$$

Интегрируя обе части уравнения (5.13) по времени в интервале  $[0, t]$ , получаем

$$\int_0^t \lambda(t)dt = \int_1^{R(t)} \frac{1}{P(t)} dP(t). \quad (5.14)$$

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

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln P(t). \quad (5.15)$$

Из формулы (5.15) получаем общее выражение для вероятности безотказной работы:

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]. \quad (5.16)$$

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:

$$T_0 = M[\tau] = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (5.17)$$

После преобразования:

$$T_0 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = -tP(t)|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (5.18)$$

*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  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_3$ . Тогда средняя наработка до отказа:

$$T_0 = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i. \quad (5.19)$$

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

$$T_0 \approx \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n + (N - n)t}{N}, \quad (5.20)$$

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

*Пример 5.1.* 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; осталь-

ные элементы не отказали. Определить среднюю наработку до отказа  $T_0$ .

**Решение.** Для решения задачи воспользуемся формулой (5.20):

$$T_0 = \frac{[(50 + 80 + 90 + 100 + 150)] + (100 - 5)200}{100} = 194,7 \text{ (ч)}.$$

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

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tau_i - \bar{\tau})^2, \quad (5.21)$$

где  $\bar{\tau} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N \tau_i$ .

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

$$\sigma[\tau] = \sqrt{D[\tau]}. \quad (5.22)$$

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

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = - \frac{\left[ \frac{dP(t)}{dt} \right]}{P(t)} = - \frac{P'(t)}{P(t)}. \quad (5.23)$$

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

$$P(t) = \exp \left[ - \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right]. \quad (5.24)$$

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

$$\bar{A}_1 \lambda(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot n(t)}, \quad (5.25)$$

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

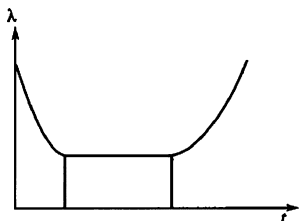


Рис. 5.2  
Зависимость изменения интенсивности отказов  $\lambda(t)$  технической системы от наработки  $t$

*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. 5.2).

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  $\lambda(t) = \text{const}$ . В этом случае при экспоненциальном законе распределения функция надежности имеет вид

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (5.26)$$

Среднее время жизни соответственно равно

$$T_0 = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (5.27)$$

Поэтому функцию надежности можно записать и так:

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right). \quad (5.28)$$

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

$$P(t) \approx 1 - \frac{t}{T_0}.$$

*Пример 5.2.* По данным эксплуатации генератора установлено, что наработка до отказа подчиняется экспоненциальному закону с параметром  $\lambda = 2 \cdot 10^{-5}$  1/ч.

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

Решение. Определим вероятность безотказной работы по формуле (5.26):

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

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

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

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

*Пример 5.3.* Построить кривую интенсивности отказов по данным таблицы 5.1. На испытания поставлено  $N$  элементов ( $N = 200$ ), испытания проводились в течение  $t = 100$  ч.

Для построения кривой (рис. 5.3) вычислим интенсивность отказов  $\lambda(t_i)$  ч<sup>-1</sup> по формуле (5.25):

$$\lambda(t_1) = \frac{10}{10 \cdot 190} = 0,0052; \quad \lambda(t_2) = \frac{8}{10 \cdot 182} = 0,0044;$$

$$\lambda(t_3) = \frac{6}{10 \cdot 176} = 0,0034; \quad \lambda(t_4) = \frac{4}{10 \cdot 172} = 0,0023;$$

$$\lambda(t_5) = \frac{2}{10 \cdot 170} = 0,0011; \quad \lambda(t_6) = \frac{2}{10 \cdot 168} = 0,0011;$$

$$\lambda(t_7) = \frac{2}{10 \cdot 166} = 0,0012; \quad \lambda(t_8) = \frac{4}{10 \cdot 162} = 0,0024;$$

$$\lambda(t_9) = \frac{5}{10 \cdot 157} = 0,0032; \quad \lambda(t_{10}) = \frac{8}{10 \cdot 149} = 0,0053.$$

$$\lambda(t) 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

Таблица 5.1

## Результаты испытаний элемента (к примеру 5.3)

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

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

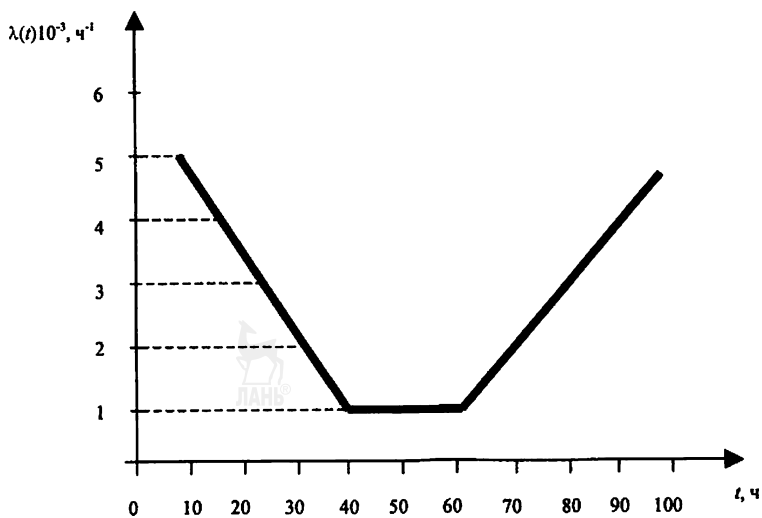


Рис. 5.3

Кривая интенсивности отказов во времени

## 5.2. 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:

$$T_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i, \quad (5.30)$$

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

*Нарботка 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:

$$\bar{t}_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{B_i}, \quad (5.31)$$

где  $t_{B_i}$  — 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

$$K_r = \frac{T_c}{T_c + \bar{t}_B}, \quad (5.32)$$

где  $T_c$  — наработка на отказ;  $\bar{t}_B$  — среднее время восстановления 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 интенсив-

ность 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

$$K_{\text{и}} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{в}} + t_{\text{р}} + t_{\text{о}}}, \quad (5.33)$$

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

**Решение.** Для определения коэффициента готовности воспользуемся формулой (5.32):

$$K_{\text{г}} = \frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{с}} + \bar{t}} = \frac{500}{500 + 5} = 0,99.$$

Ответ:  $K_{\text{г}} = 0,99$ .

**Пример 5.5.** Определить коэффициент технического использования машины, если известно, что машину эксплуатируют в течение года ( $T_э = 8760$  ч). За этот период эксплуатации машины суммарное время восстановления отказов составило  $t_в = 40$  ч. Время проведения регламента составляет  $t_о = 20$  ч. Суммарное время, затраченное на ремонтные работы за период эксплуатации, составляет 15 сут., т. е.  $t_р = 15 \cdot 24 = 360$  ч.

**Решение.** Коэффициент технического использования вычислим по формуле (5.33), но сначала определим суммарное время наработки машины:

$$t_н = T_э - (t_в + t_р + t_о) = 8760 - (40 + 360 + 20) = 8340 \text{ ч.}$$

$$K_н = \frac{t_н}{t_н + t_в + t_р + t_о} = \frac{t_н}{T_э} = \frac{8340}{8760} = 0,952.$$

Ответ:  $K_н = 0,952$ .

**Пример 5.6.** При эксплуатации сложной технической системы получены статистические данные, которые сведены в таблицу 5.2. Определить коэффициент готовности системы.

Таблица 5.2

Статистические данные, полученные при эксплуатации сложной технической системы (к примеру 5.6)

Номер системы	Число отказов $m_i$	Время, ч		
		восстановление отказа $t_{в,i}$	работы $t_р$	Суммарное восстановление $m_i t_{в,i}$
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:

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

Среднее время восстановления:

$$\bar{t}_B = \frac{\sum_{i=1}^8 m_i t_{B,i}}{\sum_{i=1}^8 m_i} = \frac{204}{70} = 2,9 \text{ ч.}$$

По формуле (5.32) по вычисленным значениям  $T_c$  и  $\bar{t}_B$  находим коэффициент готовности системы:

$$K_r = \frac{62,8}{62,8 + 2,9} = 0,95.$$

### 5.3.

#### 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  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ , ...,  $p_n(t)$ . Так как элементы, входящие в состав системы, являются независимыми, то вероятность безотказной работы системы определяется как произведение вероятностей составляющих ее элементов:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t), \dots, p_n(t). \quad (5.34)$$

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

$$P(t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t] = \exp\left[-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right]. \quad (5.35)$$

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

$$T_c = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (5.36)$$

Для случая экспоненциального распределения среднее время жизни системы равно

$$T_c = \int_0^{\infty} \exp\left[-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right] dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}. \quad (5.37)$$

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

$$T_c = \frac{T}{m}, \quad (5.38)$$

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

$$K_0 = K_r \cdot P(t) = \frac{P(t)T_c}{T_c + t_b}. \quad (5.39)$$

*Пример 5.7.* Определить коэффициент оперативной готовности системы за период времени  $t = 10$  ч, если известно, что система состоит из пяти элементов с соответствующими интенсивностями отказов,  $\text{ч}^{-1}$ :  $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ ;  $\lambda_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\lambda_3 = 10^{-5}$ ;  $\lambda_4 = 20 \cdot 10^{-5}$ ;  $\lambda_5 = 50 \cdot 10^{-5}$ , а среднее время восстановления при отказе одного элемента равно  $\bar{t}_B = 10$  ч. Результаты испытаний установлено, что распределение наработки на отказ подчиняется экспоненциальному закону.

**Решение.** Вероятность безотказной работы определим по формуле (5.35):

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

Значение  $T_c$  определяем по формуле (5.37):

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

Используя формулу (5.39), вычислим коэффициент оперативной готовности:

$$K_o = \frac{P(t)T_c}{(T_c + \bar{t}_B) \cdot P(t)} = \frac{0,992 \cdot 1282}{1282 + 10} = 0,984.$$

**Ответ:**  $K_o = 0,984$ .

**Пример 5.8.** При эксплуатации в течение одного года ( $T_3 = 1$  год = 8760 ч) изделий специального назначения были зафиксированы пять отказов ( $m = 5$ ). На восстановление каждого отказа в среднем затрачено двадцать часов ( $\bar{t}_B = 20$  ч). За указанный период эксплуатации был проведен один регламент (техническое обслуживание). Время регламента составило десять суток ( $T_p = 240$  ч). Определить коэффициенты готовности ( $K_r$ ) и технического использования ( $K_{и}$ ).

**Решение.** Коэффициент готовности определим по формуле

$$K_r = 1 - \left(\frac{m\bar{t}_B}{T_3}\right) = 1 - \left(\frac{5 \cdot 20}{8760}\right) = 0,9886.$$

Коэффициент технического использования равен

$$K_{и} = 1 - \frac{m\bar{t}_B + T_p}{T_3} = 1 - \frac{5 \cdot 20 + 240}{8760} = 0,9612.$$

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

---



## ГЛАВА ШЕСТАЯ

# РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Расчеты надежности** предназначены для определения ее количественных показателей. Они проводятся на различных этапах разработки, создания и эксплуатации объектов.

На этапе проектирования расчет надежности производится с целью прогнозирования ожидаемой надежности проектируемой системы.

На этапе испытаний и эксплуатации расчеты надежности проводятся для оценки количественных показателей надежности.

На рисунке 6.1 показаны основные виды расчетов надежности объектов.

*Элементный расчет* — определение показателей надежности объекта, обусловленных надежностью его составляющих элементов. В результате такого расчета оценивается техническое состояние объекта (вероятность работоспособного состояния объекта, средняя наработка на отказ и т. п.).

*Расчет функциональной надежности* — определение показателей надежности выполнения заданных функций (например, вероятность выработки заданного ресурса в заданных режимах эксплуатации с сохранением качественных показателей работы). Так как такие показатели зависят от ряда действующих факторов, то расчет функциональной надежности более сложен, чем элементный расчет.



Рис. 6.1  
Классификация расчетов надежности



Рис. 6.2  
Алгоритм расчета надежности системы

Выбирая на рисунке 6.1 варианты перемещений по пути, указанному стрелками, каждый раз получаем новый вид (случай) расчета.

Выбор вида расчета надежности определяется заданием на расчет надежности. В задании на расчет надежности должны быть указаны:

- 1) назначение системы, ее состав и основные сведения о работе;
- 2) показатели надежности и признаки отказов, целевое назначение расчетов;
- 3) условия работы системы;
- 4) требования к точности и достоверности расчетов, к полноте действующих факторов.

На основании задания и изучения работы объекта составляется алгоритм расчета надежности, т. е. последовательность этапов расчета и расчетные формулы (см. рис. 6.2).

## 6.1. 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:

- 1) это большое число элементов, отказ каждого из которых может привести к отказу всей системы;
- 2) оценка работоспособности сложных систем весьма затруднительна с точки зрения статистических данных, так как они часто являются уникальными или имеются в небольших количествах;

3) 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:

1) самоорганизация, саморегулирование или самоприспособление, когда система способна найти наиболее устойчивое для своего функционирования состояние;

2) возможное восстановление работоспособности по частям, без прекращения ее функционирования;

3) 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. Такую систему называют *параллельной*. Очень часто системы обладают свойствами как параллельных, так и последовательных систем — *системы со смешанным соединением*. При расчете надежности не-

обходимо 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.

## 6.2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Имеются структурные схемы надежности системы с последовательным соединением элементов (рис. 6.3), когда отказ одного элемента вызывает отказ другого элемента, а затем третьего и т. д.

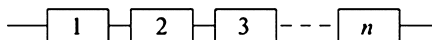


Рис. 6.3  
Структурная схема надежности системы  
с последовательным соединением элементов

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.

Такую 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*.

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

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

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (6.1)$$

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

$$P = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (6.2)$$

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 6.1.* 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  $p_4 = 0,995$ ; ходовой части  $p_5 = 0,997$ .

**Решение.** Известно, что отказ любой подсистемы приводит к отказу автомобиля. Для определения надежности автомобиля используем формулу (6.2):

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

Ответ:  $P = 0,979$ .

### 6.3. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

В практике проектирования сложных технических систем часто используют схемы с *параллельным соединением элементов* (рис. 6.4), 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.

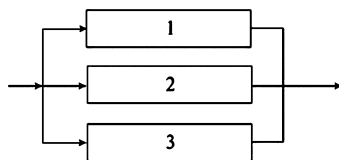


Рис. 6.4  
Структурная схема надежности системы с параллельным соединением элементов

Резервирование можно осуществлять по различным структурным схемам. На рисунке 6.5 показаны основные виды резервирования элементов в структурных схемах объектов.

Наиболее выгодным является *резервирование отдельных элементов (поэлементное резервирование)*, 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

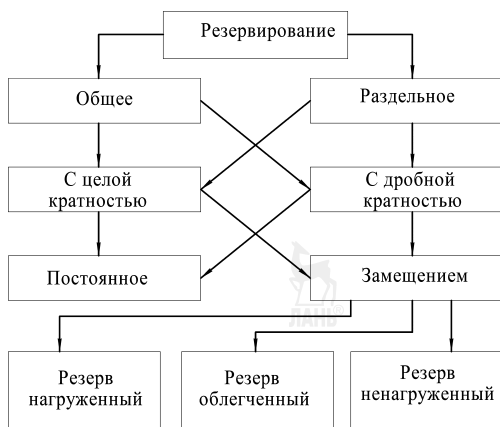


Рис. 6.5  
Способы резервирования

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.

#### 6.4. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С ОСНОВНЫМИ ВИДАМИ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

В практике проектирования технических систем часто используют структурные схемы надежности с *параллельно-последовательным соединением* элементов. Так, например, часто при проектировании систем с радио-

электронными 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

$$P(t) = p^3(t) + 3p^2(t)q(t), \quad (6.3)$$

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

$$P(t) = p^5(t) + 5p^4(t) \cdot q(t) + 8p^3(t) \cdot q^2(t) + 2p^2(t) \cdot q^3(t). \quad (6.4)$$

Здесь все элементы также имеют одинаковую надежность.

Различают структурные схемы надежности с поканальным и поэлементным резервированием.

Структурная схема надежности с поканальным резервированием показана на рисунке 6.6.

Формула надежности выглядит так:

$$P = [1 - (1 - p_{11}p_{12} \dots p_{1n}) \times (1 - p_{21}p_{22} \dots p_{2n}) (1 - p_{k1}p_{k2} \dots p_{nk})]. \quad (6.5)$$

При  $p_{ij} = p_j$

$$P = 1 - (1 - p_1p_2 \dots p_n)^k. \quad (6.6)$$

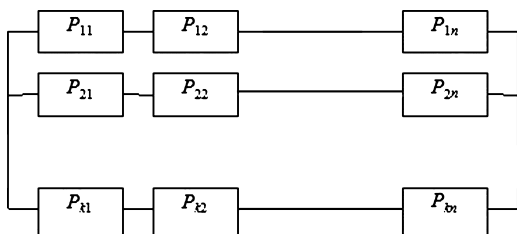


Рис. 6.6

Структурная схема надежности с поканальным резервированием

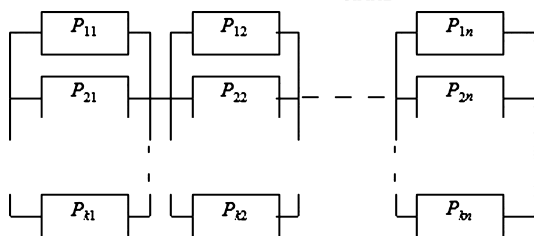


Рис. 6.7

Структурная схема надежности с поэлементным резервированием

Если  $p_{ij} = p$ , то

$$P = 1 - (1 - p^n)^k. \quad (6.7)$$

В практике проектирования часто используют структурную схему надежности с поэлементным резервированием (рис. 6.7).

Надежность такой системы определяют по формуле

$$P = [1 - (1 - p_{11})(1 - p_{21}) \dots (1 - p_{k1})] \times \\ \times [1 - (1 - p_{12})(1 - p_{22}) \dots (1 - p_{k2})] \dots \times \\ \times [1 - (1 - p_{1n})(1 - p_{2n}) \dots (1 - p_{kn})]. \quad (6.8)$$

При  $p_{ij} = p_j$

$$P = [1 - (1 - p_1)^k][1 - (1 - p_2)^k] \dots [1 - (1 - p_n)^k]. \quad (6.9)$$

Если  $p_{ij} = p$ , то

$$P = [1 - (1 - p)^k]^n. \quad (6.10)$$

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

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

$$Q = [q(t)]^n, \quad (6.11)$$

а вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - [q(t)]^n. \quad (6.12)$$

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

$$P(t) = \sum_{k=j}^n C_n^k p^k(t) q^{n-k}(t), \quad (6.13)$$

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

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

*Пример 6.2.* Техническая система предназначена для выполнения некоторой задачи. С целью обеспечения работоспособности система спроектирована со смешанным соединением элементов (рис. 6.8).

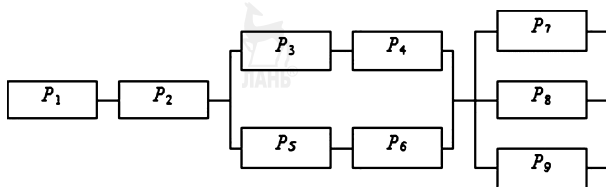


Рис. 6.8  
Структурная схема надежности технической системы

Определить надежность системы, если известно, что надежность ее элементов равна

$$\begin{aligned} p_1 &= 0,99; & p_2 &= 0,98; & p_3 &= 0,9; \\ p_4 &= 0,95; & p_5 &= 0,9; & p_6 &= 0,9; \\ p_7 &= 0,8; & p_8 &= 0,75; & p_9 &= 0,7. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 P &= p_1 p_2 [1 - (1 - p_3 p_4)(1 - p_5 p_6)] [1 - (1 - p_7)(1 - p_8)(1 - p_9)] = \\
 &= 0,99 \cdot 0,98 [1 - (1 - 0,9 \cdot 0,95)(1 - 0,9 \cdot 0,9)] \times \\
 &\quad \times [1 - (1 - 0,8)(1 - 0,75)(1 - 0,7)] = 0,927.
 \end{aligned}$$

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. 6.9) 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 приве-

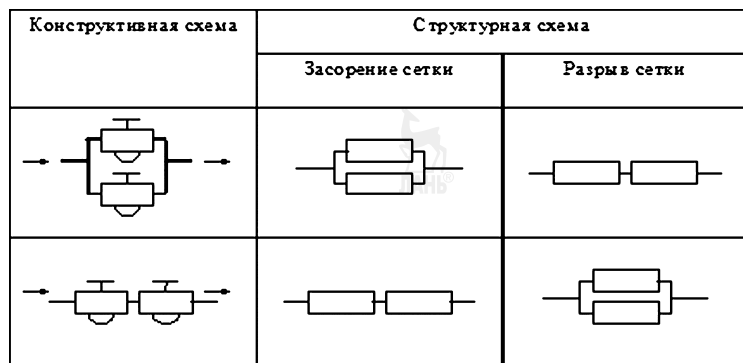


Рис. 6.9

Конструктивные и структурные схемы надежности соединения фильтров при различных видах отказов

дет к отказу системы, поскольку необходимый поток жидкости не будет проходить сквозь фильтр.

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.

### 6.5. 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

$$P(t) + R(t) = 1.$$

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

$$R(T_*) \leq R_*,$$

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:

$$R(t) = 1 - P(t).$$

Интенсивность риска аварийной ситуации (удельный риск) аналогична интенсивности отказов:

$$r(t) = -\frac{P'(t)}{P(t)} = \frac{R'(t)}{[1 - R(t)]}.$$

Поскольку уровень безопасности должен быть высоким, то можно принять

$$1 - R(t) = P(t) \approx 1.$$

Тогда интенсивность риска аварийной ситуации будет

$$R(t) \approx R'(t) = -P'(t); \quad R'(t) = \frac{dR}{dt}.$$

Поскольку время  $t$  при оценке риска аварии исчисляются в годах, то  $r(t)$  имеет смысл годового риска возникновения аварийной ситуации.

Средний годовой риск аварии:

$$r_{\text{cp}}(T) = \frac{R(T)}{T}.$$

Пусть, например,  $r_{\text{cp}} = \text{const} = 10^{-5}$  год $^{-1}$ ;  $T = 50$  лет. Тогда имеем

$$\begin{aligned} R(T) &= r_{\text{cp}}(T)T = 10^{-5} \cdot 50 = 5 \cdot 10^{-4}; \\ P(T) &= 1 - R(T) = 1 - 5 \cdot 10^{-4} = 0,9995. \end{aligned}$$

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:

$$P_n(t) = P^n(t),$$

где  $n$  — численность парка одинаковых объектов.

В этом случае функция риска

$$R_n(t) = 1 - [1 - R(t)]^n \approx n \cdot R(t)$$

при условии  $n \cdot R(t) \ll 1$ .

Аналогично для удельного риска:

$$R_{n \text{ cp}}(t) \approx n \cdot r(t) \text{ и } r_{n \text{ cp}} \approx n \cdot r_{\text{cp}}(t).$$

Инженерные расчеты инженерных конструкций на безопасность основаны на концепции коэффициентов запаса.

В этом случае расчетное условие имеет вид

$$F \leq \frac{S}{m},$$

где  $F$  — параметр воздействия;  $S$  — параметр сопротивления;  $m$  — коэффициент безопасности ( $m > 1$ ).

*Пример 6.3.* Рассмотрим объект, состоящий из реактора 1, теплообменника 2 и циркуляционного насоса 3

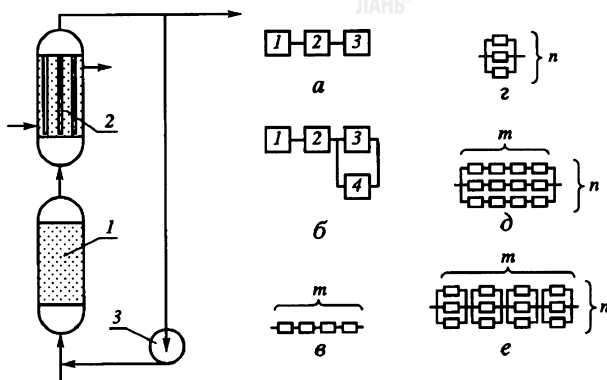


Рис. 6.10

Технический объект, структурные схемы и блок-схемы систем при расчете надежности и безопасности:

Соединения элементов: *a, в* — последовательное; *г* — параллельное; *б, д, е* — смешанное. *1* — реактор; *2* — теплообменник; *3* — циркуляционный насос; *4* — резервный насос.

(рис. 6.10), который может быть представлен в случае независимости отказов элементов объекта в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 6.10*а*. Если в объекте дополнительно установить резервный насос 4, то будет иметь место блок-схема, представленная на рисунке 6.10*б*.

Если элементы взаимодействуют таким образом (как на блок-схемах рисунка 6.10*а, в*), что переход в аварийное состояние любого из них приводит к аварийному отказу системы, то соединение элементов можно рассматривать как последовательное. Безаварийное состояние системы в этом случае может рассматриваться как случайное событие, равное пересечению (произведению) независимых событий — безаварийной работы каждого из элементов. Следовательно, функция безопасности  $S(t)$  системы, согласно теореме умножения независимых событий, равна произведению функций безопасности элементов:

$$S(t) = \prod_{k=1}^m S_k(t),$$

где  $m$  — число элементов системы;  $S_1(t) \dots S_m(t)$  — функции безопасности каждого из элементов.

Если элементы системы одинаковы, т. е.  $S_1(t) = S_2(t) = \dots = S_m(t) = S_0(t)$ , то имеем

$$S(t) = S_0^m(t).$$

В случае экспоненциального закона вероятности безаварийной работы элементов  $S_0(t) = \exp(-\lambda_0 t)$  получим выражения для функции безопасности  $S(t)$  и математического ожидания ресурса  $M(T)$ , т. е. среднего ресурса  $T_c$  до перехода в аварийное состояние системы:

$$S(t) = \exp(-m\lambda_0 t), \quad T_c = \int_0^{\infty} S(t) dt = \frac{T_{c0}}{m}.$$

Эти соотношения отражают известное положение о том, что если элементы системы взаимодействуют по схеме последовательного соединения, то показатели безопасности работы системы ниже соответствующих показателей любого из ее элементов. При этом с увеличением числа элементов показатели безопасности системы быстро падают.

Один из способов повышения безопасности систем — метод резервирования, заключающийся во введении в систему дополнительных элементов или подсистем сверх количества, минимально необходимого для выполнения заданных функций (как это сделано с резервным насосом на рисунке 6.10б).

Блок-схема простейшего способа резервирования при параллельном соединении элементов показана на рисунке 6.10г, когда отказ системы происходит лишь в том случае, если откажут все элементы. Вероятность перехода системы в аварийное состояние равна произведению вероятностей отказов ее элементов.

Следовательно, функция безопасности  $S(t)$  системы:

$$S(t) = 1 - \prod_{k=1}^n [1 - S_k(t)].$$

Если элементы системы одинаковы, т. е.  $S_1(t) = S_2(t) = \dots = S_n(t) = S_0(t)$ , получаем

$$S = 1 - (1 - S_0)^n.$$

Например, в случае экспоненциального распределения закона вероятности безаварийной работы элементов системы  $S_0(t) = \exp(-\lambda_0 t)$  средний ресурс системы  $T_c$  может быть вычислен по формуле

$$T_c = T_{c0} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}.$$

При условии независимости отказов элементов безопасность системы с параллельным соединением элементов возрастает с увеличением кратности резервирования. Так, уже при однократном резервировании, т. е. дублировании в случае, когда вероятность безаварийной работы элемента  $S_0 = 0,99$ , для системы получаем  $S = 0,9999$ . Средний ресурс системы возрастает в 1,5 раза.

На рисунке 6.10*д* представлена блок-схема, в которой каждая подсистема резервирована  $(n - 1)$  раз. В этом случае функция безопасности системы

$$S(t) = 1 - \left[ 1 - \prod_{k=1}^m S_k(t) \right]^n.$$

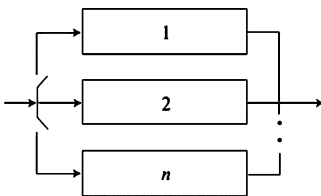


Рис. 6.11  
Блок-схема системы с резервированием при замещении отказавшего элемента

На блок-схеме, изображенной на рисунке 6.10*е* показан способ отдельного резервирования. На этой схеме каждый элемент резервируется  $(n - 1)$  раз, после чего подсистемы соединяют последовательно. В этом случае

$$S(t) = \prod_{k=1}^m [1 - (1 - S_k)^n].$$

Блок-схемы на рисунке 6.10*в-е* соответствуют случаям, когда все резервные элементы находятся в рабочем состоянии.

Наряду с этим можно строить схемы, в которых резервные элементы включаются в работу только в случае отказа очередного элемента (рис. 6.11) или резервные элементы работают в облегченном дежурном режиме.

### 6.6. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ «ЧЕЛОВЕК — МАШИНА» (СЧМ)

В технических системах большую роль играют действия человека-оператора. Примерно 20...30% отказов прямо или косвенно связаны с ошибками человека, 10...15% всех отказов непосредственно связаны с ошибками человека. Ввиду этого анализ надежности технических систем должен обязательно включать человеческий фактор.

Надежность работы человека определяется как вероятность успешного выполнения им работы или поставленной задачи в течение заданного промежутка времени при определенных требованиях к продолжительности выполнения работы. В общем виде схема воздействий на человека, управляющего потенциально опасной техникой в системе СЧМ, представлена на рисунке 6.12.

Надежность характеризует безошибочность (правильность) решения стоящих перед СЧМ задач. Оценивается



Рис. 6.12  
Факторы, воздействующие на человека-оператора

вероятностью правильного решения задач, которая, по статистическим данным, определяется соотношением

$$P_{\text{пр}} = 1 - \frac{m_{\text{от}}}{N},$$

где  $m_{\text{от}}$  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:

$$\gamma = I_{\text{н}} - I_{\text{оп}},$$

где  $I_{\text{н}}$  — истинное или номинальное значения параметра;  $I_{\text{оп}}$  — 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:

$$P_{\text{св}} = P\{T_{\text{ц}} \leq T_{\text{доп}}\} = \int_0^{T_{\text{доп}}} \varphi(T) dT,$$

где  $\varphi(T)$  — функция плотности времени решения задачи системой «человек — машина».

Эта вероятность по статистическим данным равна

$$P_{\text{св}} = 1 - \frac{m_{\text{нс}}}{N},$$

где  $m_{\text{нс}}$  — число несвоевременно решенных СЧМ задач.

В качестве *общего показателя надежности* используется вероятность правильного ( $P_{\text{пр}}$ ) и своевременного ( $P_{\text{св}}$ ) решения задачи:

$$P_{\text{счм}} = P_{\text{пр}} \cdot P_{\text{св}}.$$

*Безопасность труда человека в СЧМ* оценивается вероятностью безопасной работы:

$$P_{\text{б.т}} = 1 - \sum_{i=1}^n P_{\text{воз.}i} \cdot P_{\text{от.}i},$$

где  $P_{\text{воз.}i}$  — вероятность возникновения опасной или вредной для человека производственной ситуации  $i$ -го типа;  $P_{\text{от.}i}$  — вероятность неправильных действий оператора в  $i$ -й ситуации;  $n$  — число возможных травмоопасных ситуаций.

*Степень автоматизации СЧМ* характеризует относительное количество информации, перерабатываемой автоматическими устройствами:

$$K_{\text{а}} = 1 - \frac{H_{\text{оп}}}{H_{\text{счм}}},$$

где  $H_{\text{оп}}$  — количество информации, перерабатываемой оператором;  $H_{\text{счм}}$  — 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  $C_{\text{и}}$ , затрат на подготовку операторов  $C_{\text{оп}}$  и эксплуатационных расходов  $C_{\text{э}}$ :

$$W_{\text{счм}} = E_{\text{н}}(C_{\text{и}} + C_{\text{оп}}) + C_{\text{э}},$$

где  $E_{\text{н}}$  — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных затрат ( $C_{\text{и}} + C_{\text{оп}}$ ).

*Эргономические показатели* учитывают совокупность специфических свойств СЧМ и представляют иерархическую структуру, включающую в себя ценностную эргономическую характеристику (эргономичность СЧМ), комплексные управляемость, обслуживаемость,

освояемость 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:

$$P_j = \frac{N_j - n_j}{N_j}; \quad \lambda_j = \frac{n_j}{N_j \cdot T_j},$$

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:

$$P_{\text{оп}} = \prod_{j=1}^r P_j^{k_j} = e^{-\sum_{j=1}^r (1-P_j)k_j} = e^{-\sum_{j=1}^r \lambda_j \cdot T_j \cdot k_j},$$

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:

$$K_{\text{оп}} = 1 - \frac{T_0}{T},$$

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:

$$P_{\text{исп}} = P_{\text{к}} \cdot P_{\text{об}} \cdot P_{\text{и}},$$

где  $P_{\text{к}}$  — вероятность выдачи сигнала системой контроля;  $P_{\text{об}}$  — вероятность обнаружения оператором сигнала контроля;  $P_{\text{и}}$  — вероятность исправления ошибочных действий при повторном выполнении операций.

Основным *показателем своевременности* является вероятность выполнения задачи в течение времени  $\tau < t_{\text{д}}$ :

$$P_{\text{св}} = \{\tau < t_{\text{д}}\} = \int_0^{t_{\text{д}}} f(\tau) d\tau,$$

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

$$P_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^m P_i \cdot P_{\text{оп},i},$$

где  $P_i$  — вероятность наступления  $i$ -го состояния СЧМ;  $P_{\text{оп},i}$  — условная вероятность безошибочной работы опе-

ратора 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  $t$ :

$$P_{ч. м1}(t) = P_T(t) + [1 - P_T(t)]K_{оп} \times \\ \times [P_{оп} \cdot P_{св} + (1 - P_{оп})P_{исп}(t_{л})],$$

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:

$$P_{ч. м2} = K_T \cdot P_T \cdot P_{оп} P_{св} + \\ + (1 - P_T \cdot K_T)P_{вос} \cdot P_{оп} \cdot P_{св} + (1 - P_{оп})P_T \cdot P_{исп}.$$

где  $K_T$  — коэффициент готовности техники;  $P_{вос}$  — вероятность восстановления отказавшей техники.

Вероятность  $P_{ч. м1}$  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  $P_{ч. м2}$  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) не готовая 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.

## 6.7. 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%:

$$P_S(t) = P_{\text{ч}}(t) \cdot P_{\text{м}}(t),$$

где  $P_S$  — показатель надежности всей системы;  $P_{\text{ч}}$  — показатель надежности человека;  $P_{\text{м}}$  — показатель надежности машины.

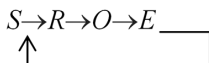
Надежность человека при проектировании машины должна также учитываться, как и надежность машины. Между надежностью и инженерной психологией как областями науки существует естественная связь. Обе области связаны с прогнозированием и улучшением характеристик систем, но действуют они разными способами и средствами. Специалист по надежности изменяет конструкцию, материал, схему, снижает нагрузки. Специалист по инженерной психологии воздействует на 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 ха-

рактизовать комбинацией трех параметров: входного сигнала ( $S$ ), внутренней реакции ( $R$ ), отклика на выходе ( $O$ ).

Упрощенную математическую модель поведения человека представим в следующем виде:



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 средства 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, так как только человек обладает гибкостью, необходимой для принятия нужного решения, связанного 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 6.4.* Сконструировать ручку управления, обеспечивающую вероятность безотказной эксплуатации  $P_o(t) = 0,994$ , по исходным данным, приведенным в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Исходные данные к примеру 6.4

Параметр	Значение	$P(t)$
Длина ручки, мм	152–128	0,9963
Величина перемещения ручки, мм	30–40	0,9975
Соппротивление управлению	2,3–4 кг	0,9999

**Решение.** Вероятность безотказной эксплуатации ручки управления равна

$$P_3(t) = 0,9963 \cdot 0,9975 \cdot 0,9999 = 0,9937.$$

Используя опытные данные по надежности работы человека, можно проигнорировать вероятность колебания ошибок человека при выполнении контрольного задания.

**Пример 6.5.** Рассчитать надежность операции нажатия на кнопку оператором при загорании зеленой лампочки. Исходные данные приведены в таблице 6.2. Расчленим операции на элементы:  $S$  — зажигание лампы,  $R$  — обдувание,  $O$  — нажатие кнопки.

Таблица 6.2

Исходные данные к примеру 6.5

№ п	Кнопка	$P(t)$	Лампочка	$P(t)$
1	Диаметр кнопки (миниатюрная)	0,9995	Диаметр лампочки 6,4...12,7 мм	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		

**Решение.**

$$P_O = 0,9995 \cdot 0,9997 \cdot 0,9993 \cdot 0,9998 = 0,9983;$$

$$P_S = 0,9997 \cdot 0,9975 \cdot 0,9996 = 0,9968.$$

Вероятность нажатия на кнопку оператором определится из выражения

$$\begin{aligned} P_q(t) &= P_S(t) \cdot P_R(t) \cdot P_O(t) = \\ &= 0,9968 \cdot 0,999 \cdot 0,9983 \approx 0,9941. \end{aligned}$$



ГЛАВА СЕДЬМАЯ

**МЕТОДЫ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**



**Д**ля недопущения отказов конструктивного, производственного и эксплуатационного характера существуют общепринятые мероприятия, методы и средства предупредительного, контролирующего и защитного характера, обеспечивающие надежность и безопасность технических систем. Их применяют на различных этапах жизненного цикла системы — в процессе проектирования, на последующих стадиях изготовления и эксплуатации системы.

**7.1.  
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 подтверждать 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 надежности 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.

Существует 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 ремонтопригодности, 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 систе-

мы 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.

## 7.2. 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 вмешаться в технологический процесс.

*Выборочный метод контроля* не оказывает непосредственного влияния на производство, так как 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

$$K_T = \frac{T}{\omega},$$

где  $T$  — допуск;  $\omega$  — поле рассеяния контролируемого параметра в соответствующей выборке.

*Коэффициент смещения* характеризует относительную величину смещения центра рассеяния размеров от середины поля допуска:

$$K_C = \frac{x - \Delta_0}{2},$$

где  $x$  — среднее арифметическое значение центра рассеяния;  $\Delta_0$  — координата середины поля допуска:

$$\Delta_0 = \frac{T_n + T_v}{2},$$

где  $T_n$  и  $T_v$  — нижнее и верхнее предельные отклонения параметра.

В случае, если коэффициент  $K_T > 1$ , то точность технологического процесса хорошая, если  $K_T = 0,95 \dots 1$ , то точность удовлетворительная, при  $K_T \leq 0,9 \dots 0,7$  точность неудовлетворительная.

### 7.3. 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

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3,$$

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

$$P_2 = \prod_{i=1}^n P_i,$$

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.

#### 7.4. 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, которые 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 электронной техники и т. д.).

## 7.5.

### ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ И ПОДДЕРЖАНИЮ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Обеспечение эксплуатационной надежности и безопасности сложной и ответственной техники представляет собой замкнутый цикл последовательных операций (рис. 7.1)

Известно, что в процессе эксплуатации изделие определенное время используют по назначению для выполнения соответствующей работы, некоторое время оно транспортируется и хранится, а часть времени идет на техническое обслуживание и ремонт. При этом для сложных технических систем в нормативно-технической документации устанавливают виды технического 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 устране-

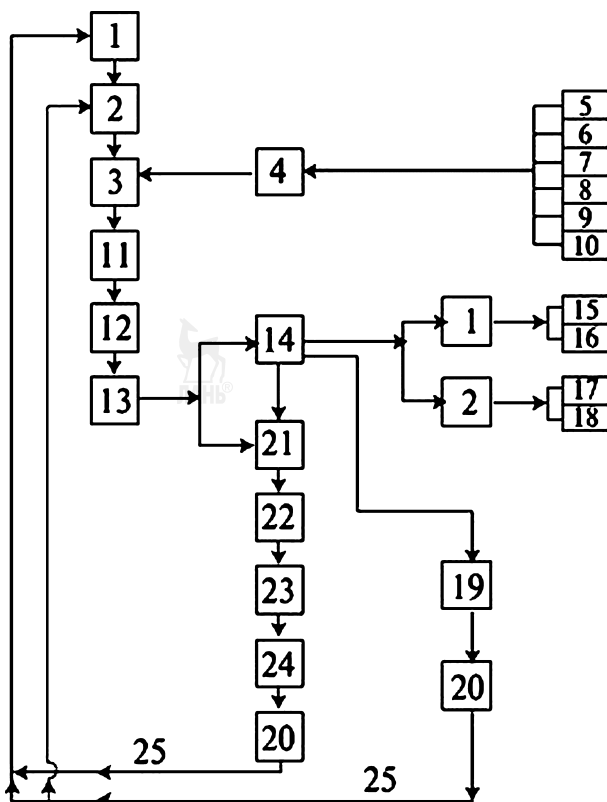


Рис. 7.1  
Алгоритм обеспечения

эксплуатационной надежности и безопасности системы:

1 — конструкция оборудования; 2 — существующая практика эксплуатации; 3 — информация; 4 — средства получения информации; 5 — причины отказов; 6, 7 — сведения соответственно о расходе запасных частей, частоте их замены и потерях производства, вызванных простоями; 8 — данные результатов инспекций оборудования; 9 — сведения об изменениях размеров и свойств материала деталей при эксплуатации; 10 — другие сведения; 11 — обработка информации; 12 — анализ причин отказов и выявление слабых мест; 13 — принятие решения; 14 — решение о немедленном изменении конструкции, практики эксплуатации или технического обслуживания (ТО) и ремонта оборудования; 15, 16, 17, 18 — изменение соответственно конструкции, материала детали, практики эксплуатации, ТО и ремонта; 19 — проверка предложений в эксплуатации; 20 — данные эксплуатации после внесенных изменений; 21 — решение о проведении исследований; 22 — разработка методики исследований; 23 — результаты исследований; 24 — усовершенствование конструкции или практики эксплуатации оборудования на основе исследований; 25 — обратная связь.

ние 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 составляет 1:10, для механических элементов — 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 со-


здание и использование технических систем. Затраты на поддержание в работоспособном состоянии за счет технических обслуживаний и ремонтов превышают стоимость новых изделий в следующее число раз: тракторов и самолетов в 5...8 раз; металлорежущих станков в 8...15 раз; радиоэлектронной 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.



---



## ГЛАВА ВОСЬМАЯ

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ РИСКА



### 8.1. ПОНЯТИЕ РИСКА И ФАКТОРОВ ЕГО ПРОЯВЛЕНИЯ

**Н**овое российское законодательство об охране здоровья граждан, охране окружающей среды, охране труда, санитарно-эпидемиологическом благополучии населения, защите прав потребителей выдвигает проблему комплексной оценки безопасности жизнедеятельности людей как в условиях конкретной производственной системы, так и в масштабах города, региона, страны. Особое значение в связи с этим приобретают методы интегральных оценок неблагоприятных факторов, воздействующих на здоровье людей и среду обитания.

Первые обобщающие звенья в построении таких методик — идентификация опасностей, декомпозиционные схемы опасных и чрезвычайных ситуаций, классификация источников и факторов риска, их сравнительная оценка.

В Федеральном законе «Об основах охраны труда в РФ», содержащем права работника на охрану труда, указано, что каждый имеет право «на получение достоверной информации от работодателя или государственных и общественных органов о состоянии условий и охране труда на рабочем месте, о существовании риска повреждения здоровья». Этими положениями обусловлена актуальность и необходимость разработки проблемы оценки риска.

Понятие риска является многоплановым, поэтому используются различные производные этого понятия в за-

висимости от области применения и стадии анализа опасности.

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, материальный ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличения затрат на безопасность.

Значением слова «риск» является «возможность или вероятность человеческих жертв и материальных потерь или травм и повреждений».

Нас интересуют проблемы безопасности человека и окружающей среды. 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 неопределенностью 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.

Риск — это мера ожидаемой неудачи, неблагоприятия в деятельности, опасность наступления для здоровья человека неблагоприятных последствий; определенные явления, наступление которых содержит возможность материальных потерь. Для риска характерны неожиданность, внезапность наступления опасной ситуации, что предполагает быстрые решительные действия по устранению или ослаблению воздействия источника опасности.

Риск — количественная характеристика действия опасностей, формируемых конкретной деятельностью человека, т. е. число смертельных случаев, число случаев заболевания, число случаев временной и стойкой нетрудоспособности (инвалидности), вызванной действием на человека конкретной опасности (электрический ток, вредное вещество,двигающийся предмет, криминальные элементы общества и др.), отнесенных на определенное количество жителей (работников) за конкретный период времени. Значение риска от конкретной опасности можно получить из статистики несчастных случаев, случаев заболевания, случаев насильственных действий на членов общества за различные промежутки времени: смена, сутки, неделя, квартал, год.

Риск в настоящее время все чаще используется для оценки воздействия негативных факторов производства. Это связано с тем, что риск как количественную характеристику реализации опасностей можно использовать для оценки состояния условий труда, экономического ущерба, определяемого несчастным случаем и заболеваниями на производстве, формировать систему социальной политики на производстве (обеспечение компенсаций, льгот).

Аналитически риск выражает частоту реализации опасностей по отношению к возможному их числу. В общем виде значение риска можно определить по формуле

$$R = \frac{N(t)}{Q(f)}, \quad (8.1)$$

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. Кроме того, точки реализации опасности распределены в пространстве и во времени. В терминах риска принято описывать и опасности от достоверных событий, происходящих с веро-

ятностью, 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.

Опасности могут быть реализованы в форме травм или заболеваний только в том случае, если зона формирования опасностей (ноксосфера) пересекается с зоной деятельности человека (гомосфера). В производственных условиях — это рабочая зона и источник опасности как элемент производственной среды (рис. 8.1).

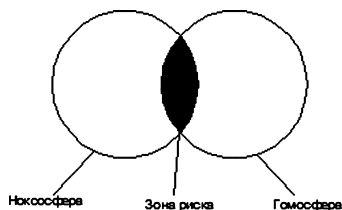


Рис. 8.1  
Формирование области действия опасности на человека в производственных условиях

Использование риска в качестве единого индекса вреда при оценке действия различных негативных факторов на человека в настоящее время применяется для обоснованного сравнения безопасности различных отраслей экономики и типов работ, аргументации социальных преимуществ и льгот для определенной категории лиц.

Достижение некоторого приемлемого индекса вреда риска является не только оценкой безопасности в какой-либо одной отрасли промышленности, но и для оценки изменения этого уровня безопасности со временем и при различных условиях труда. Это также важно для количественного установления диапазона риска по всей промышленности в целом так, чтобы безопасность пределов воздействия различных производственных факторов могла быть оценена в части перспективы профессионального риска вообще, его изменения и сокращения.

Ожидаемый (прогнозируемый) риск  $R$  — это произведение частоты реализации конкретной опасности  $f$  на

произведение вероятностей нахождения человека в зоне риска при различном регламенте технологического процесса:

$$R = f \prod_i^n p_i (i = 1, 2, 3, \dots, n), \quad (8.2)$$

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.

Использование формулы (8.2) для оценки вероятности производственного риска удобно тем, что, основываясь на имеющихся на производстве данных о частоте несчастных случаев, можно прогнозировать величину возможного риска, так как регламент технологических процессов дает четкие сведения о времени взаимодействия человека с производственными опасностями в течение рабочего дня, недели, года, т. е. позволяет определить вероятность нахождения работника в зоне риска. Такой прогноз очень полезен при формировании мероприятий по улучшению условий труда на производстве, так как использование формулы (8.2) позволяет определять величины рисков воздействия различных негативных факторов для конкретного технологического процесса производства, проводить оценку значимости каждого фактора с позиции безопасности, что и является основой формирования мероприятий по улучшению условий труда.

Любой вид риска является результатом проявления одного или целой совокупности опасных явлений и факторов. Приведем наиболее важные из них и связанные с риском понятия.

*Авария* — разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ.

*Анализ риска аварии* — процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды.

*Безопасность* — состояние защищенности человека, общества и окружающей среды от чрезмерной опасности.

*Допустимый (приемлемый) риск* — максимальное значение риска, нормативно приемлемое современным обществом или государством.

*Идентификация опасностей* — процесс выявления (распознавания) и параметрического описания опасностей в поле их действия.

*Катастрофа* — крупная авария, повлекшая за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и разрушение или уничтожение объектов и других материальных ценностей в значительных размерах, а также приведшая к значительному ущербу окружающей среде.

*Критерий безопасности* — показатель качества среды обитания по параметрам влияния вредных и опасных факторов в зоне пребывания человека.

*Обеспечение безопасности* — системный подход к принятию решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасных аварий для жизни и здоровья человека, ущерба имуществу и окружающей среде.

*Опасная зона (ноксосфера)* — пространство, в котором постоянно существуют или периодически возникают опасности.

*Опасность* — негативное свойство человека и окружающей среды, способное причинять ущерб живой и неживой материи.

*Опасность аварии* — угроза, возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде вследствие аварии на опасном производственном объекте.

*Опасный производственный объект* — объект, производство, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют пожаро- и взрыво-

опасные и (или) опасные химические вещества, создающие реальную угрозу возникновения аварии.

*Отказ (неполадка)* — событие, заключающееся в нарушении работоспособности состояния объекта.

*Оценка риска* — процесс, используемый для определения степени риска анализируемой опасности для здоровья человека, имущества или окружающей среды.

*Показатель риска* — измеренная или рассчитанная величина, количественно характеризующая вероятность или частоту возникновения опасной ситуации.

*Последствия аварии* — возникшая в результате аварии обстановка, наносящая ущерб за счет превышения установленных пределов воздействия на персонал, население и окружающую среду.

*Потенциальная опасность* — это угроза общего характера, не связанная с координатами пространства и временем воздействия.

*Происшествие* — событие, состоящее из негативного воздействия опасного фактора с причинением ущерба людским, природным и материальным ресурсам.

*Риск, или степень риска*, — это сочетание частоты (или вероятности) реализации и последствий негативного воздействия опасного события.

*Техногенная чрезвычайная ситуация* — состояние, при котором в результате возникновения источника техногенной чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, объектам экономики и окружающей природной среде.

*Техносфера* — среда обитания, возникшая с помощью прямого или косвенного воздействия людей и технических средств на природную среду с целью наилучшего соответствия среды социально-экономическим потребностям человека.

*Управление риском* — часть системного подхода к принятию решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности аварий

для жизни, заболеваний или травм человека, ущерба материальных ценностей и окружающей природной среде.

*Ущерб от аварии* — потери (убытки) в производственной и непроизводственной сфере жизнедеятельности человека, вред окружающей природной среде, причиненные в результате аварии на опасном производственном объекте и исчисляемые в денежном эквиваленте.

*Чрезвычайная ситуация (ЧС)* — нарушение нормальной жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией и приведшее или могущее привести к людским и материальным потерям.

*Чрезвычайное происшествие (ЧП)* — событие, происшедшее обычно кратковременно и обладающее высоким разрушительным уровнем негативного воздействия на людей, природные и материальные ресурсы.

## 8.2.

### КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ 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.

Одной из наиболее часто употребляющихся характеристик опасности является *индивидуальный риск* — частота поражения отдельного индивидуума (человека) в результате воздействия исследуемых факторов опасности.

Индивидуальный риск характеризует реализацию опасности определенного вида деятельности для конкретного индивидуума. Используемые в нашей стране показатели производственного травматизма и профессиональной заболеваемости, такие как частота несчастных случаев

и профессиональных заболеваний, являются выражением индивидуального производственного риска.

Источником индивидуального риска в производственной сфере является профессиональная деятельность, а наиболее распространенным фактором риска — опасные и вредные производственные факторы.

Классификация источников опасности и уровни риска смерти человека представлены в таблице 8.1.

В производственных условиях значение индивидуального риска используется для количественной оценки потенциальной опасности конкретного рабочего места, вида деятельности, рабочей зоны и т. п.

Индивидуальный риск обусловлен вероятностью реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций. В общем случае количественно (численно) индивидуальный риск выражается отношением числа пострадавших людей к общему числу рискующих за определенный период времени. Его можно определить по числу реализовавшихся факторов риска:

$$R_{\text{и}} = \frac{P(t)}{L(f)}, \quad (8.3)$$

где  $R_{\text{и}}$  — индивидуальный риск;  $P$  — число пострадавших (погибших) в единицу времени  $t$  от определенного фактора риска  $f$ ;  $L$  — число людей, подверженных соответствующему фактору риска в единицу времени  $t$ .

Другим комплексным показателем риска, характеризующим пространственное распределение опасности по объекту и близлежащей территории, является *потенциальный территориальный риск* — частота реализации поражающих факторов в рассматриваемой точке территории.

Потенциальный территориальный (или потенциальный) риск не зависит от факта нахождения объекта воздействия (например, человека) в данном месте пространства. Предполагается, что условная вероятность нахождения объекта воздействия равна единице, т. е. человек находится в данной точке пространства в течение всего рассматриваемого промежутка времени.

Таблица 8.1  
Индивидуальные риски для жизни человека от различных источников опасности

Источник опасности		Причины смерти	Индивидуальная вероятность смерти (чел.год) <sup>-1</sup>
Среда	Окружающая общая	Природная	Несчастные случаи при опасных природных явлениях
		Искусственная	Несчастные случаи в быту, на транспорте, заболеваемость от загрязнения внешней среды и т. д.
Деятельность	Обитания человека	Социальная	Самоубийства и самоповреждения, убийства и повреждения с преступными целями, убийства и ранения, связанные с волевыми действиями и т. п.
		Внутренняя (организма)	Генетические и соматические заболевания
Деятельность	Профессиональная	Профессиональные заболевания, несчастные случаи на производстве	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-2</sup>
	Непрофессиональная	Заблеваемость и несчастные случаи в любительском спорте и других видах не-профессиональной деятельности	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-2</sup>

Потенциальный риск в соответствии с названием выражает собой потенциал максимально возможной опасности для конкретных объектов воздействия (реципиентов), находящихся в данной точке пространства. Как правило, потенциальный риск оказывается промежуточной мерой опасности, используемой для оценки социального и индивидуального риска при крупных авариях.

Распределения потенциального риска и населения в исследуемом районе позволяют получить количественную оценку социального риска для населения. Для этого нужно рассчитать количество пораженных при каждом сценарии от каждого источника опасности и затем определить частоту событий  $F$ , при которой может пострадать на том или ином уровне  $N$  и более человек.

Распределение потенциального территориального риска, показывающего максимальное значение частоты поражения человека от возможных аварий для каждой точки площадки объекта и прилегающей территории, показано на рисунке 8.2.

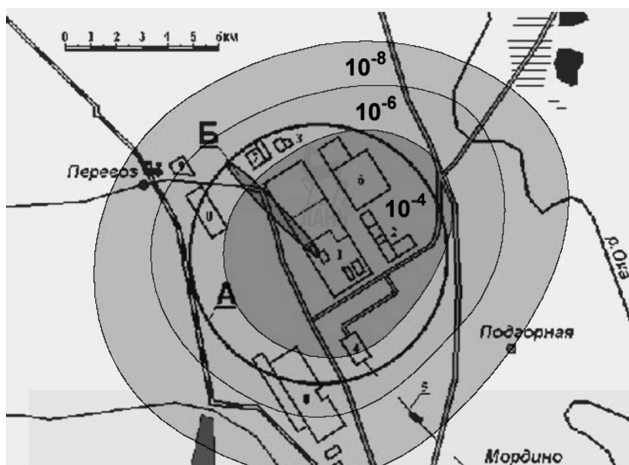


Рис. 8.2

Распределение потенциального риска по территории вблизи объекта, на котором возможны аварии с крупным выбросом токсичных веществ

Цифрами у изолиний показано значение частоты гибели человека за один год (1/год), (при условии его постоянного местонахождения в данной точке); А — граница зон поражения людей, рассчитанных для сценариев аварии с одинаковой массой выброса по всем направлениям ветра; Б — зона поражения для отдельного сценария при заданном направлении ветра.

*Технический 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:

$$R_T = \frac{\Delta T(t)}{T(f)}, \quad (8.4)$$

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.

Другой количественной интегральной мерой опасности объекта является *коллективный риск*, определяющий ожидаемое количество пострадавших в результате возможных аварий на объекте за определенный период времени.

В производственных условиях коллективный риск — это травмирование или гибель двух и более человек от воздействия опасных и вредных производственных факторов.

*Экологический риск* — это возможность появления неустранимых экологических запретов: развитие тепличного эффекта, разрушение озонового слоя, радиоактивное загрязнение, кислотные осадки. С точки зрения количественной оценки понятие «экологический риск» может быть сформулировано как отношение величины возможного ущерба от воздействия вредного экологического фактора за определенный интервал времени к нормированной величине интенсивности этого фактора. Под возможным ущербом прежде всего имеется в виду здоровье человека.

Экологический риск выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия:

$$R_{\text{эко}} = \frac{\Delta\mathcal{E}(t)}{\mathcal{E}}, \quad (8.5)$$

где  $R_{\text{эко}}$  — экологический риск;  $\Delta\mathcal{E}$  — число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий в единицу времени  $t$ ;  $\mathcal{E}$  — число потенциальных источников экологических разрушений на рассматриваемой территории.

Нежелательные события экологического риска могут проявляться как непосредственно в зонах вмешательства, так и за их пределами.

Масштабы экологического риска  $R_3^T$  оцениваются процентным соотношением площади кризисных или катастрофических территорий  $\Delta S$  к общей площади рассматриваемого биогеоценоза  $S$ :

$$R_{\text{эко}}^T = \frac{\Delta S}{S} \cdot 100. \quad (8.6)$$

Дополнительным косвенным критерием экологического риска может служить интегральный показатель экологичности территории предприятия, соотносимый с динамикой плотности населения (численности работающих):

$$\mathcal{E}_T = \pm \Delta L = \frac{\pm \Delta M(t)}{S}, \quad (8.7)$$

где  $\mathcal{E}_T$  — уровень экологичности территории;  $\Delta L$  — динамика плотности населения (работающих);  $S$  — площадь исследуемой территории;  $\Delta M$  — динамика прироста численности населения (работающих) в течение периода наблюдения  $t$ :

$$\Delta M = G + F - U - V, \quad (8.8)$$

где  $G$ ,  $F$ ,  $U$ ,  $V$  — соответственно численность родившихся за наблюдаемый период, прибывших в данную местность на постоянное место жительства, умерших и погибших, выехавших в другую местность на постоянное место жительства (уволившихся).

В этой формуле разность  $G - U$  характеризует естественный, а  $F - V$  — миграционный прирост населения на территории (текущая кадров).

Положительные значения уровней экологичности позволяют разделять территории по степени экологического благополучия, и наоборот, отрицательные значения уровней — по степени экологического бедствия. Кроме того, динамика уровня экологичности территории позволяет судить об изменении экологической ситуации на ней за длительные промежутки времени, определить зоны

экологического бедствия (демографического кризиса) или благополучия.

Экологические факторы — факторы, обусловленные причинами природного характера (неблагоприятными для жизни человека физико-химическими характеристиками атмосферы, воды, почв, функциональными характеристиками экосистемы, природными бедствиями и катастрофами). В современных условиях основным источником экологического риска является техногенное влияние на окружающую природную среду, а наиболее распространенными факторами экологического риска — загрязнение водоемов, атмосферного воздуха вредными веществами, почвы отходами производства; изменение газового состава воздуха; энергетическое загрязнение биосферы. Влияние указанных факторов на сокращение длительности жизни человека иллюстрируют данные таблицы 8.2.

*Социальный риск* характеризует масштабы и тяжесть негативных последствий чрезвычайных ситуаций, а также различного рода явлений и преобразований, снижающих качество жизни людей. По существу — это риск для группы или сообщества людей. Оценить его можно, например, по динамике смертности, рассчитанной на 1000 человек соответствующей группы:

$$R_c = \frac{1000(C_2 - C_1)\{t\}}{L}, \quad (8.9)$$

где  $R_c$  — социальный риск;  $C_1$  — число умерших в единицу времени  $t$  (смертность) в исследуемой группе в начале периода наблюдения до развития чрезвычайных событий;  $C_2$  — смертность в той же группе людей в конце периода наблюдения, например на стадии затухания чрезвычайной ситуации;  $L$  — общая численность исследуемой группы.

Одним из основных источников социального риска являются промышленные технологии и объекты повышенной опасности, а соответствующими факторами социального риска — аварии на АЭС, ТЭС, химических комбинатах, продуктопроводах, транспортные катастрофы, техногенное загрязнение окружающей среды (рис. 8.3).

Таблица 8.2

**Сокращение ожидаемой продолжительности жизни,  
вызываемое различными экологическими причинами**

Причины риска	Ожидаемое сокращение жизни, дни
Радон в помещениях	35
Работа с химикатами	30
Постоянная работа с излучениями	25
Сокращение озонового слоя	22
Пестициды в пищевых продуктах	12
Загрязнение атмосферного воздуха	10
Загрязнение питьевой воды	1,3
Проживание вблизи АЭС	0,4

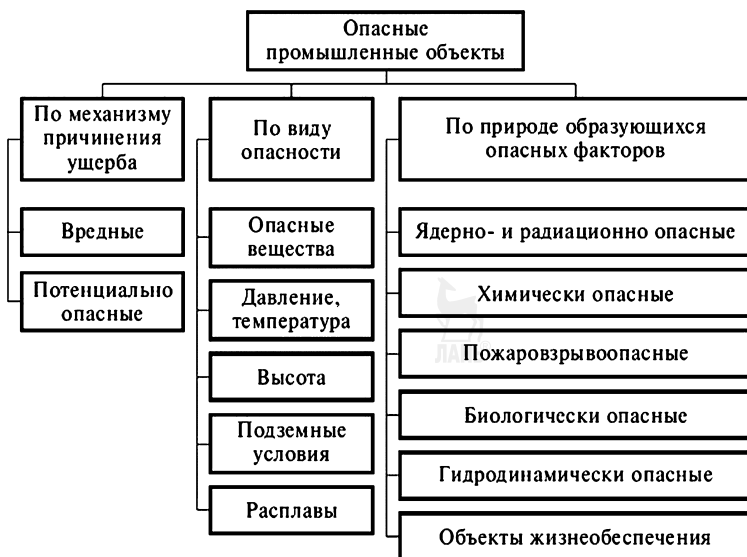


Рис. 8.3

Классификация видов опасности,  
характерных для опасных промышленных объектов

В производственных условиях значение социального риска используется для интегральной количественной оценки опасных производственных объектов, характеристики масштаба воздействия аварии.

Масштаб социального риска от возможных аварий определяется функцией, называемой  $F-N$ -кривой. В зависимости от задач анализа под  $N$  можно понимать общее число пострадавших, число смертельно травмированных или другой показатель тяжести последствий. Величина  $F$  является частотой событий по отношению к числу  $N$ . В этом случае критерий приемлемой степени риска будет определяться не числом, а кривой, построенной для различных сценариев аварии.

Ориентировочные оценки опасностей различных производств, аварий технических объектов и катастрофических природных явлений с помощью  $F-N$ -кривых приведены на рисунке 8.4.

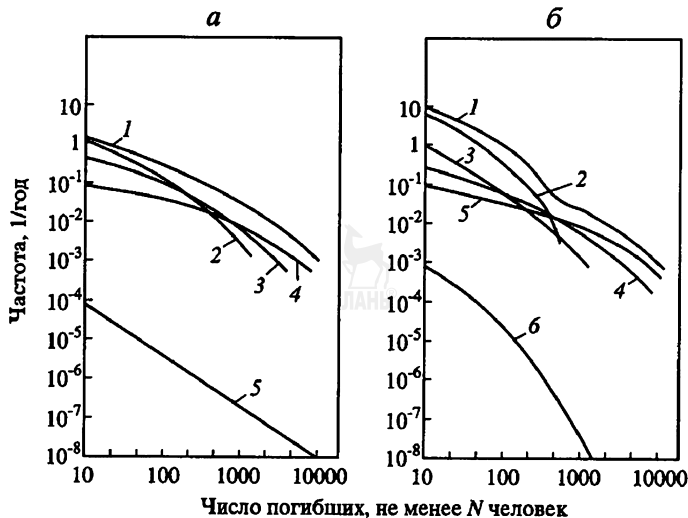


Рис. 8.4

$F-N$ -кривые для природных (а) и техногенных (б) рисков:

а: 1 — суммарная кривая; 2 — торнадо; 3 — ураганы; 4 — землетрясения; 5 — метеориты; б: 1 — суммарная кривая; 2 — аварии самолетов; 3 — пожары; 4 — взрывы; 5 — выбросы; 6 — 100 ядерных реакторов.

*Экономический риск* определяется соотношением пользы и вреда, получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности:

$$R_э = \frac{В}{П} \cdot 100, \quad (8.10)$$

где  $R_э$  — экономический риск, %; В — вред обществу от рассматриваемого вида деятельности; П — польза.

Для целей экономического регулирования промышленной безопасности и страхования важным является такой показатель экономического риска, как статистически *ожидаемый ущерб* в стоимостных или натуральных показателях.

В условиях хозяйственной деятельности необходим поиск оптимального соотношения затрат на безопасность и возможного ущерба от недостаточной защищенности. Найти его можно, если задаться некоторым значением реально достижимого уровня безопасности производства.

Использование рассматриваемых видов риска позволяет выполнять поиск оптимальных решений по обеспечению безопасности жизнедеятельности как на уровне предприятия, так и на макроуровнях в масштабах инфраструктур.

### 8.3. МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ 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).

Риск (или степень риска) в зависимости от целей анализа оценивается соответствующими показателями (качественными или количественными), например ожидаемыми уровнями негативных последствий аварий за определенный промежуток времени (ожидаемым ущербом, вероятностью возникновения аварий с определенными последствиями).

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 разработки мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций. В общем виде методология проведения анализа риска показана на рисунке 8.5.

Обычно анализ риска рассматривают как часть системного подхода к принятию политических решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности для жизни человека, за-

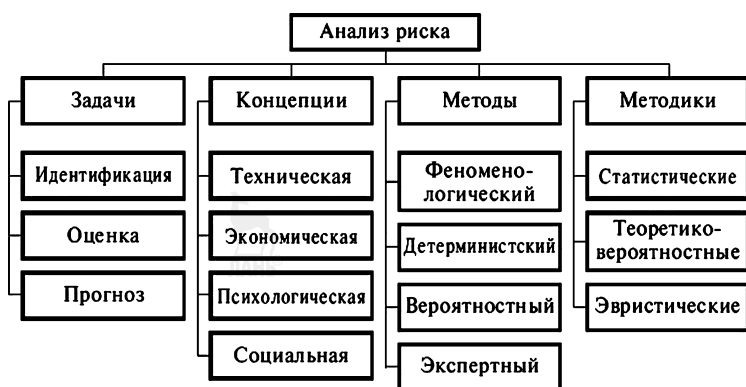


Рис. 8.5  
Методический аппарат анализа риска

болезней или травм, ущерба имуществу и окружающей среде, называемого управление риском.

Оценка риска является важным аналитическим инструментом, позволяющим определить факторы риска для здоровья человека, их соотношение и на этой основе наметить направления деятельности по минимизации риска.

Оценка риска — это анализ происхождения (возникновения) и масштабы риска в конкретной ситуации.

Вкладом в реализацию Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и определенным 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 введен 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  $N_0$  за определенный период времени, т. е.  $P = \frac{N}{N_0}$ . Помимо этого, используется понятие «степень риска»  $R$ , т. е. вероятность наступления нежелательного события с учетом размера возможного ущерба от события. Степень риска можно представить как математическое ожидание величины ущерба от нежелательного события:

$$R(U) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot U_i,$$

где  $P_i$  — вероятность наступления события, связанного с ущербом;  $U_i$  — случайная величина ущерба, причиненного экономике, здоровью и т. п.

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. Строгого 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.

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

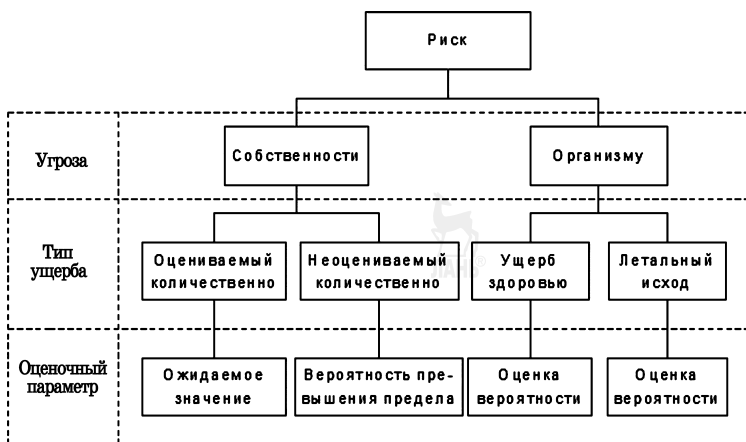


Рис. 8.6  
Схема оценки риска

основание для принятия решений в отношении риска (рис. 8.6).

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.

Понятие риска всегда включает два элемента: частоту, с которой осуществляется опасное событие, и последствия опасного события. Анализ риска, в свою очередь, 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. В случае, когда последствия неизвестны, то под риском понимают вероятность наступления определенного сочетания нежелательных событий. Техногенный риск включает как вероятность чрезвычайной ситуации, так и величину ее последствий, оцениваемых величиной ущерба.

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.

В качестве примера на рисунке 8.7 приведена схема анализа техногенного риска.



Рис. 8.7

Блок-схема анализа техногенного риска

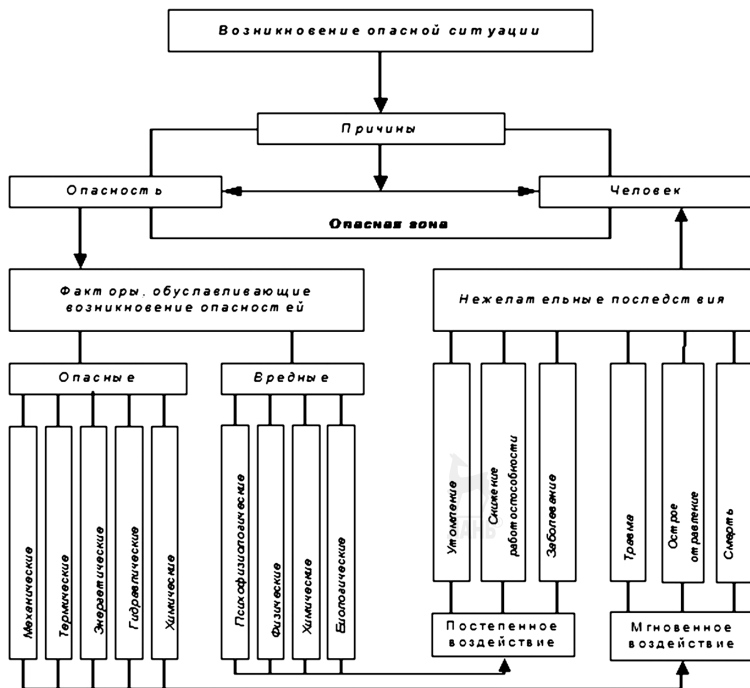


Рис. 8.8

Декомпозиция опасной ситуации

Применяемые методы (методики) должны удовлетворять следующим требованиям:

1) научно обоснованы и соответствуют рассматриваемой технической системе;

2) основываются на принципах и критериях, установленных в действующих нормативных документах;

3) дают результаты в виде, позволяющем лучше понимать характер опасности, выявлять наиболее слабые места и процессы в системе функционирования объекта и намечать пути управления риском.

Первое, с чего начинается любой анализ риска, — это планирование и организация работ. Поэтому на первом этапе необходимо:

1) указать причины и проблемы, вызывавшие необходимость проведения риск-анализа;

2) определить анализируемую систему и дать ее описание;

3) подобрать соответствующую команду для проведения анализа;

4) установить источники информации о безопасности системы;

5) указать исходные данные и ограничения, обуславливающие пределы риск-анализа;

6) 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 присутствующих системе опасностей (рис. 8.8).

Здесь же проводится предварительная оценка опасностей с целью выбора дальнейшего направления деятельности:

1) прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей;

2) провести более детальный анализ риска;

3) выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

В принципе процесс риск-анализа может заканчиваться уже на этапе идентификации опасностей.

При необходимости 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 рекомендаций 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:

1) исторические данные, соответствующие по типу системы, объекта или вида деятельности;

2) статистические данные по аварийности и надежности оборудования;

3) логические методы анализа деревьев событий или деревьев отказов (при ортодоксальном подходе к предмету эти методы обычно рассматриваются как единственно приемлемые для оценки риска);

4) 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 (пожары, 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 предположений, использованных при оценке риска, в неопределенность результатов.

Следует отметить, что сложные и дорогостоящие расчеты зачастую дают значение риска, точность которого невелика.

Наибольший объем рекомендаций по обеспечению безопасности вырабатывается с применением качественных (инженерных) методов анализа риска, позволяющих достигать основных целей риск-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 риском могут иметь технический, эксплуатационный или организационный характер.

#### 8.4. КАЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКА

Для обеспечения сравнимости степени риска для жизнедеятельности территорий, объектов техносферы, видов деятельности, причин (источников опасности), обоснованного выбора для реализации проектов при наличии альтернатив используются показатели риска. В зависимости от возможности формализации задачи и имеющейся исходной информации могут быть использованы следующие показатели:

- качественные, которые применяют тогда, когда отсутствует возможность количественных оценок (необходимые статистика, модели);
- количественные.

Объектом анализа опасностей 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 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 потенциальных опасностей можно разделить на:

1) инженерные методы с использованием статистики, когда производится расчет частот, проводится вероятностный анализ безопасности и построение деревьев опасности.

2) модельные методы, основанные на построении моделей воздействия опасных и вредных факторов на отдельного человека, на профессиональные и социальные группы населения.

3) экспертные методы, включающие определение вероятностей различных событий на основе опроса опытных специалистов-экспертов.

4) социологические методы, которые основаны на опросе населения.

Для отражения различных аспектов опасности эти методы применяются в комплексе.

Анализ опасностей 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 опасностей позволяют определить источники опасностей, потенциальные аварии и несчастные случаи, последовательности развития собы-

тий, пути предотвращения аварий (несчастных случаев) и смягчения последствий.

Анализ опасностей начинают с предварительного исследования, позволяющего идентифицировать источники опасности. Затем проводят детальный качественный анализ.

Выбор качественного метода анализа опасностей зависит от цели анализа, назначения объекта и его сложности. Качественные методы анализа опасностей включают:

- методы «Проверочного листа» и «Что будет, если...?»;
- анализ вида и последствий отказов;
- анализа вида, последствий и критичности отказа;
- анализ опасности и работоспособности;
- анализ опасностей с помощью дерева отказов (аварий) и дерева событий.

Ниже представлена краткая характеристика основных методов, рекомендуемых для проведения анализа риска.

1. Методы «Проверочного листа» и «Что будет, если...?» или их комбинация относятся к группе методов качественных оценок опасности, основанных на изучении соответствия условий эксплуатации объекта или проекта требованиям промышленной безопасности.

Результатом проверочного листа является перечень вопросов и ответов о соответствии опасного производственного объекта требованиям промышленной безопасности и указания по их обеспечению. Метод проверочного листа отличается от «Что будет, если...?» более обширным представлением исходной информации и представлением результатов о последствиях нарушений безопасности.

Эти методы наиболее просты (особенно при обеспечении их вспомогательными формами, унифицированными бланками, облегчающими на практике проведение анализа и представление результатов), нетрудоемки (результаты могут быть получены одним специалистом в течение одного дня) и наиболее эффективны при исследовании безопасности объектов с известной технологией.

2. Анализ вида и последствий отказов (АВПО) применяется для качественного анализа опасности рассматриваемой технической системы. Под технической системой

в зависимости от целей анализа могут пониматься как совокупность технических устройств, так и отдельные технические устройства или их элементы.

Существенной чертой этого метода является рассмотрение каждого аппарата (установки, блока, изделия) или составной части системы (элемента) на предмет того, как он стал неисправным (вид и причина отказа) и какое было бы воздействие отказа на техническую систему.

Анализ вида и последствий отказа можно расширить до количественного анализа вида, последствий и критичности отказа (АВПКО). В этом случае каждый вид отказа ранжируется с учетом двух составляющих критичности — вероятности (или частоты) и тяжести последствий отказа. Определение параметров критичности необходимо для выработки рекомендаций и приоритетности мер безопасности.

Результаты анализа представляются в виде таблиц с перечнем оборудования, видом и причин возможных отказов, частотой, последствиями, критичностью, средствами обнаружения неисправности (сигнализаторы, приборы контроля и т. п.) и рекомендациями по уменьшению опасности.

Систему классификации отказов по критериям «вероятность — тяжесть последствий» конкретизируют для каждого объекта или технического устройства с учетом его специфики.

Ниже (табл. 8.3) в качестве примера 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.

В таблице 8.3 применены следующие варианты критериев:

а) критерии отказов по тяжести последствий:

б) катастрофический отказ — приводит к смерти людей, существенному ущербу имуществу, наносит невосполнимый ущерб окружающей среде;

Таблица 8.3

## Матрица «вероятность — тяжесть последствий»

Частота возникновения отказа, 1/год		Тяжесть последствий отказов			
		катастрофический отказ	критический отказ	некритический отказ	отказ с пренебрежимо малыми последствиями
Частый отказ	$>1$	А	А	А	С
Вероятный отказ	$1-10^{-2}$	А	А	В	С
Возможный отказ	$10^{-2}-10^{-4}$	А	В	В	С
Редкий отказ	$10^{-4}-10^{-6}$	А	В	С	Д
Практически невероятный отказ	$<10^{-6}$	В	С	С	Д

в) критический/некритический отказ — угрожает/не угрожает жизни людей, приводит/не приводит к существенному ущербу имущества, окружающей среде;

г) отказ с пренебрежимо малыми последствиями — отказ, не относящийся по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий.

Категории (критичность) отказов:

- «А» — обязателен количественный анализ риска, или требуются особые меры обеспечения безопасности;
- «В» — желателен количественный анализ риска, или требуется принятие определенных мер безопасности;
- «С» — рекомендуется проведение качественного анализа опасностей или принятие некоторых мер безопасности;
- «Д» — анализ и принятие специальных (дополнительных) мер безопасности не требуются.

Методы АВПО, АВПКО применяются, как правило, для анализа проектов сложных технических систем или технических решений.

3. В методе «Анализ опасности и работоспособности» (АОР) исследуется влияние отклонений технологических

параметров (температуры, давления и пр.) от регламентных режимов с точки зрения возможности возникновения опасности. АОР по сложности и качеству результатов соответствует уровню АВПО, АВПКО.

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.

Результаты анализа представляются на специальных технологических листах (таблицах). Степень опасности отклонений может быть определена количественно путем оценки вероятности и тяжести последствий рассматриваемой ситуации по критериям критичности аналогично методу АВПКО (см. табл. 8.3).

Отметим, что метод АОР, так же как и АВПКО, кроме идентификации опасностей и их ранжирования, позволя-



ет выявить неясности и неточности в инструкциях по безопасности и способствует их дальнейшему совершенствованию. Недостатки методов связаны со сложностью их применения для анализа комбинаций событий, приводящих к аварии.

4. Практика показывает, что крупные аварии, как правило, характеризуются комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях возникновения и развития аварии (отказы оборудования, ошибки человека, нерасчетные внешние воздействия, разрушение, выброс, пролив вещества, рассеяние веществ, воспламенение, взрыв, интоксикация и т. д.). Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы анализа деревьев отказов и деревьев событий.

При *анализе дерева отказов (АДО)* выявляются комбинации отказов (неполадок) оборудования, инцидентов, ошибок персонала и нерасчетных внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящих к головному событию (аварийной ситуации). Метод используется для анализа возможных причин возникновения аварийной ситуации и расчета ее частоты (на основе знания частот исходных событий). При анализе дерева отказа (аварии) рекомендуется определять минимальные сочетания событий, определяющие возникновение или невозможность возникновения аварии (минимальное пропускное и отсеченное сочетания соответственно).

*Анализ дерева событий (АДС)* — алгоритм построения последовательности событий, исходящих из основного события (аварийной ситуации). Используется для анализа развития аварийной ситуации. Частота каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события (например, аварии с разгерметизацией оборудования с горючим веществом в зависимости от условий могут развиваться как с воспламенением, так и без воспламенения вещества).

*Пример 8.1.* Применение метода качественного анализа опасности. В таблице 8.4 представлен фрагмент результатов анализа опасности и работоспособности цеха холодильно-компрессорных установок.

В процессе анализа для каждой установки, производственной линии или блока определяются возможные отклонения, причины и рекомендации по обеспечению безопасности. При характеристике каждого возможного отклонения используются ключевые слова «нет», «больше», «меньше», «так же как», «другой», «иначе чем», «обратный» и т. п. В таблице 8.4 представлены также экспертные балльные оценки вероятности возникновения рассматриваемого отклонения В, тяжести последствий Т и показателя критичности  $K = B + T$ . Показатели В и Т определялись по 4-балльной шкале (балл, равный 4, соответствует максимальной опасности).

Отклонения, имеющие повышенные значения критичности, далее рассматривались более детально, в том числе при построении сценариев аварийных ситуаций и количественной оценки риска.

## 8.5.

### КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКА

Анализ опасностей имеет дело с потенциальными повреждающими факторами и потенциальными авариями или несчастными случаями.

Методы количественного анализа риска, как правило, характеризуются расчетом нескольких показателей риска и могут включать один или несколько методов (или использовать их результаты).

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.

Таблица 8.4

## Перечень отклонений при применении метода изучения опасности и работоспособности компрессорного узла цеха холодно-компрессорных установок (фрагмент результатов)

Ключевое слово	Отклонение	Причины	Последствия	В	Т	К	Рекомендации
МЕНЬШЕ	Нет потока вещества	Разрыв трубопровода	Выброс аммиака	2	4	6	Установить систему аварийной сигнализации
		Отказ в системе питания	Опасности нет	3	1	4	Повысить надежность системы резервирования
БОЛЬШЕ	Повышение давления нагнетания компрессора	Закрыт нагнетательный вентиль	Разрушение компрессора и выброс аммиака	1	2	3	Заменить реле давления, предохранительный и обратные клапана
		Отсутствует или недостаточная подача воды на конденсатор	Как в п. 3	1	2	3	
		Наличие большого количества воздуха в конденсаторе	Образование взрывоопасной смеси	1	3	4	
	Повышение температуры нагнетательного компрессора	Нет протока воды через охлаждаемую рубашку компрессора	Разрушение компрессора с выбросом аммиака	1	2	3	Установить реле температуры на компрессорах ВД и НД
		Чрезмерный перегрев паров аммиака на всасывании	Как в п. 6	1	2	3	
МЕНЬШЕ	Понижение давления всасывания	Повышенная производительность компрессора	Опасности нет	1	1	2	Проверить реле давления

Количественный анализ риска позволяет оценивать и сравнивать различные опасности по единым показателям и 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. 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

$$\sum_{i=1, n} P\{E_i\} = 1.$$

Для равновероятных событий ( $P\{E_i\} = p, i = 1, 2, \dots, n$ ), образующих полную группу событий, вероятность равна

$$p = \frac{1}{n}.$$

Противоположные события  $E_i$  и  $(-E_i)$  образуют полную группу, поэтому

$$P\{E\} = 1 - P\{-E\}.$$

На практике пользуются формулой объективной вероятности:

$$P\{E\} = \frac{n_E}{n},$$

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

$$P\{E_1E_2\} = P\{E_1\}P\{E_2\}.$$

При  $n$  независимых событиях  $E_1, E_2, \dots, E_n$  получим

$$P\left\{\prod_{i=1,n} E_i\right\} = \prod_{i=1,n} P\{E_i\}.$$

Для компонентов системы и системы в целом

$$P_i = P\{E_i\}; \quad q = P\{-E_i\} = 1 - p_i;$$

$$p = P\{E\}; \quad q = P\{-E\} = 1 - p.$$

Логическая функция системы имеет вид

$$E = F(E_1, E_2, \dots, E_n).$$

Применяя правила теории вероятностей, находят вероятность нежелательного события в виде функции опасности:

$$p = F_p(p_1, p_2, \dots, p_n).$$

*Подсистемой «ИЛИ»* называют часть системы, компоненты которой соединены последовательно. К нежелательному событию в такой подсистеме приводит отказ любого компонента подсистемы. Если  $E_i$  есть отказ  $j$ -го компонента, то отказ подсистемы «ИЛИ» есть событие:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{j=1,m} E_j,$$

где  $m$  — число компонентов.

Если отказы компонентов взаимно независимы, то вероятность отказа в подсистеме «ИЛИ»:

$$P\left\{\sum_{j=1, m} E_j\right\} = 1 - P\left\{\prod_{j=1, m} (-E_j)\right\} = 1 - \prod_{j=1, m} (1 - P\{E_j\}).$$

Для равновероятных отказов вероятность отказа в этой подсистеме:

$$P\{E\} = 1 - (1 - p)^m.$$

Это выражение свидетельствует о высокой вероятности отказа в случае сложных систем. Например, при вероятности отказа компонента  $p = 0,1$  подсистема «ИЛИ», состоящая из десяти 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. К отказу такой подсистемы приводит отказ всех ее компонентов:

$$E = E_1 \cdot E_2 \cdot \dots \cdot E_m = \prod_{j=1, m} E_j.$$

Если отказы компонентов можно считать взаимно независимыми, то вероятность отказа в подсистеме «И»:

$$P\{E\} = \prod_{i=1, m} P\{E_j\}.$$

На практике подсистемой «И» является операция резервирования, которую применяют, когда необходимо достичь высокой надежности системы, если имеется опасность аварии.

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 не-

желательного 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».

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»:

$$P\{E_i\} = 1 - \prod_{j=1, n} (1 - P\{E_{ij}\}).$$

С учетом соотношения для вероятности подсистемы «И» находим вероятность отказа подсистемы «И — ИЛИ»:

$$P\{E\} = \prod_{i=1, m} \left[ 1 - \prod_{j=1, n} (1 - P\{E_{ij}\}) \right].$$

*Подсистемой «ИЛИ — И»* в системе называют подсистемы «И», соединенные в подсистему «ИЛИ».

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»:

$$P\{E_i\} = 1 - \prod_{j=1, n} P\{E_{ij}\}.$$

Используя соотношение для вероятности подсистемы «ИЛИ», находим вероятность отказа подсистемы «ИЛИ — И»:

$$P\{E\} = 1 - \prod_{i=1, m} \left[ 1 - \prod_{j=1, n} P\{E_{ij}\} \right].$$

Чаще всего риск определяется как возможность реализации опасности чего-либо, возможность наступления

событий с отрицательными последствиями, т. е. характеризуется совокупностью двух свойств:

а) неоднозначностью наступления опасного события, т. е. его вероятностью;

б) возможностью причинения вреда.

Для оценки степени опасности важны не только частота (или вероятность) ее появления, но и тяжесть последствий для индивидуума, общества или окружающей среды.

Риск часто связывают с размером ущерба от опасного события или явления, как правило, в натуральном (число пострадавших и погибших, размер зоны действия опасных факторов) или стоимостном выражении.

Чтобы сделать эту оценку количественной, вводят понятие риска  $R$ , определяемого как произведение вероятности  $P$  неблагоприятного события (аварии, катастрофы и т. п.) и ожидаемого ущерба  $U$  в результате этого события:

$$R = P \cdot U$$

или

$$R = \sum_i P_i \cdot U_i,$$

если могут иметь место несколько ( $i$ ) неблагоприятных событий с различными вероятностями  $P_i$  и соответствующими им ущербами  $U_i$ .

Учитывая, что размер ущерба в задачах прогноза является случайной величиной  $U$ , описываемой функцией распределения:

$$F(u) = P(U < u),$$

в качестве показателя риска часто используют условную вероятность:

$$Q(u_*) = P(U > u_*)$$

превышения ущербом заданного уровня  $u_*$  (или его нахождения в определенном интервале) при условии, что негативное событие произошло.

Понятие риска связывают с возможностью наступления сравнительно редких событий. Под редкими понимают такие события, математическое ожидание числа которых за интервал времени  $\Delta t$  удовлетворяет неравенству  $a(\Delta t) < 0,1$ . При этом риск часто отождествляют с вероятностью  $Q(\Delta t)$  наступления этих событий за интервал времени  $\Delta t$  (как правило, за год). Вероятность  $Q(\Delta t)$  выступает в этом случае как мера (показатель) риска, удобная для сравнения рисков для одного объекта (субъекта) от различных событий или для различных объектов (субъектов) в типовых для них условиях функционирования (деятельности) и однородными последствиями проявления опасности.

Если в течение года может произойти  $N$  опасных явлений (в частном случае  $N < 1$ ), то ущерб от них вычисляется по формуле

$$U = \sum_{i=1}^N u_i = a(\Delta t)\bar{u},$$

где  $u_i$  — ущерб от  $i$ -го опасного явления.

Пусть поток опасных явлений является простейшим пуассоновским. Тогда вероятность наступления на интервале времени  $\Delta t$  хотя бы одного события определяется по формуле

$$Q(\Delta t) = 1 - \exp[-a(\Delta t)],$$

где  $a(\Delta t) = \lambda\Delta t$ ;  $\lambda$  — частота опасных явлений, 1/лет.

Для редких событий, т. е. при  $a(\Delta t) \ll 1$ , получим  $Q(\Delta t) \approx a(\Delta t)$ . Если  $\Delta t = 1$  году, то при  $a(\Delta t) < 0,1$  получим  $Q(\Delta t) \approx \lambda$ .

Следовательно, показателем риска будет математическое ожидание (среднее значение) ущерба от опасного явления за год:

$$R = \sum_{i=0}^1 P(H_i)u_i = Q(\Delta t)\bar{u},$$

где  $P(H_0) = Q(\Delta t)$ ,  $P(H_1) = 1 - Q(\Delta t)$ ,  $u_0 = \bar{u}$ ,  $u_1 = 0$ ,  $\bar{u}$  — средний ущерб при реализации опасного явления.

Таким образом, показателем риска в рамках технократической концепции, применимым для любых  $N$ , является

$$\begin{aligned} \text{Показатель риска} \left[ \frac{\text{ущерб}}{\text{время}} \right] &= \\ &= \text{частота} \left[ \frac{\text{события}}{\text{время}} \right] \times \text{средний ущерб} \left[ \frac{\text{ущерб}}{\text{события}} \right]. \end{aligned}$$

Из приведенных соотношений следует, что независимыми переменными, по которым оценивается риск, являются время  $t$  и ущерб  $W$ , а для оценки (прогноза) риска необходимо определять частоты реализаций опасных явлений и ущерб от них. Для определения основных компонент риска необходимо рассматривать распределение опасных явлений во времени и по ущербу.

Таблица 8.5

## Рекомендации по выбору методов анализа риска

Метод	Вид деятельности				
	размещение (предпроектные работы)	проектирование	ввод/вывод из эксплуатации	эксплуатация	реконструкция
Анализ «Что будет, если...?»	0	+	++	++	+
Метод проверочного листа	0	+	+	++	+
Анализ опасности и работоспособности	0	++	+	+	++
Анализ видов и последствий отказов	0	++	+	+	++
Анализ деревьев отказов и событий	0	++	+	+	++
Количественный анализ риска	++	++	0	+	++



*Примечание.* «0» — наименее подходящий метод анализа; «+» — рекомендуемый метод; «++» — наиболее подходящий метод.

Рекомендации по выбору методов анализа риска для различных видов деятельности и этапов функционирования опасного производственного объекта представлены ниже (табл. 8.5).

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 анализа риска должен использовать результаты качественного анализа опасностей.



---



## ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

# ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ И РИСКА

**О**пасности 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 отказов, дерево аварий, дерево опасностей, дерево неисправностей.

Анализ причин промышленных аварий показывает, что возникновение и развитие крупных аварий, как правило, характеризуются 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, воспламенение, взрыв, интоксикация и т. д.). Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы деревьев отказов и событий.

Методы деревьев отказов и событий позволяют учесть функциональные взаимосвязи элементов системы в виде логических схем, учитывающих взаимозависимость отказов элементов или групп элементов системы. В общем случае как деревья отказов, так и деревья событий являются наглядной иллюстрацией к простейшим вероятностным моделям. Однако они представляют значительный интерес для

специалистов, связанных с эксплуатацией, обслуживанием и надзором технических объектов. Имея такую схему, специалист может не только найти наиболее критический вариант развития событий, но и оценить ожидаемый риск.

Методы анализа деревьев — наиболее трудоемки, они применяются для анализа проектов или модернизации сложных технических систем и производств и требуют высокой квалификации исполнителей.

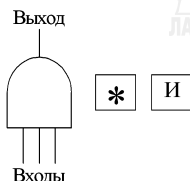
### 9.1. МЕТОД ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

Дерево отказов (дерево аварий) представляет собой сложную графологическую структуру, лежащую в основе словесно-графического способа анализа возникновения аварии из последовательностей и комбинаций неисправностей и отказов элементов системы.

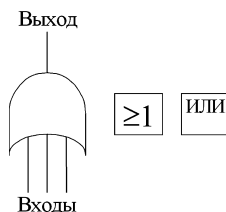
С помощью анализа дерева отказов проводится попытка количественно выразить риск дедуктивным методом. Деревья отказов идентифицируют событие или ситуацию, создающие риск, после чего ставится вопрос: как могло возникнуть такое событие? Такой анализ может проводиться детально на многих уровнях. Наиболее доступные причины аварийной ситуации — это отказы компонентов системы, по которым имеется достаточное количество статистических данных.

#### 9.1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СИМВОЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ДЕРЕВА (ГРАФА)

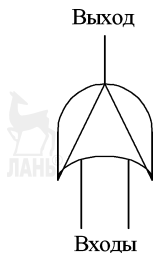
*Схема И* (схема совпадения): сигнал на выходе появляется только тогда, когда поступают все входные сигналы; для изображения используются символы:



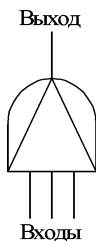
**Схема ИЛИ** (схема объединения): сигнал на выходе появляется при поступлении на вход любого одного или большего числа сигналов; для изображения используются символы:



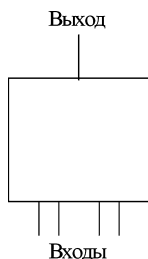
**Схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ**: сигнал на выходе рассматривается как промежуточное событие и появляется при поступлении на вход одного и только одного сигнала; для изображения используется символ



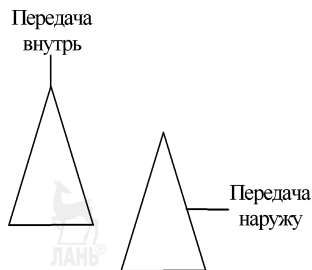
**Схема И С ПРИОРИТЕТОМ** логически эквивалентна схеме И, но входные сигналы должны поступать в определенном порядке; для изображения используется символ



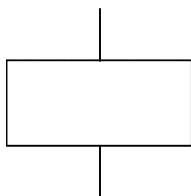
**СПЕЦИАЛЬНАЯ** схема отображает любую другую разрешенную комбинацию входных сигналов; для изображения используется символ



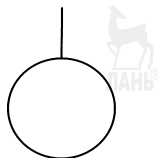
**ВХОД** или **ВЫХОД** изображаются с помощью треугольников, что позволяет избежать повторения отдельных участков дерева. Прямая, входящая в вершину треугольника, означает переход внутрь соответствующей ветви, а прямая, берущая начало из середины боковой стороны треугольника, — переход к другой ветви.



**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



#### 9.1.2. ПРОЦЕДУРА АНАЛИЗА ДЕРЕВА ОТКАЗОВ (НЕИСПРАВНОСТЕЙ)

При анализе методом *деревьев отказов* выявляются комбинации отказов (неполадок) оборудования, ошибок персонала и внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящих к основному событию (аварийной ситуации). Метод используется для анализа возникновения аварийной ситуации и расчета ее вероятности (на основе задания вероятностей исходных событий).

Процедура построения и анализа 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 отказов (неисправностей) для логически связанных событий на входе. Эти события должны определяться по идентифицируемому независимым первичным отказам. 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 определение границ системы, построение дерева отказов (неисправностей), качественная оценка, количественная оценка.

Обычно система изображается в виде блок-схемы, показывающей все функциональные взаимосвязи и элементы. При построении дерева отказов (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.

### 9.1.3. ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

Дерево отказов (аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий и пр.) лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов и другими событиями (воздействиями). При анализе возникновения отказа дерево отказов состоит из последовательностей и комбинаций нарушений и неисправностей и представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей (рис. 9.1).

Основной целью построения дерева отказов (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.

Обычно предполагается, что исследователь, прежде чем приступить к построению дерева отказов (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

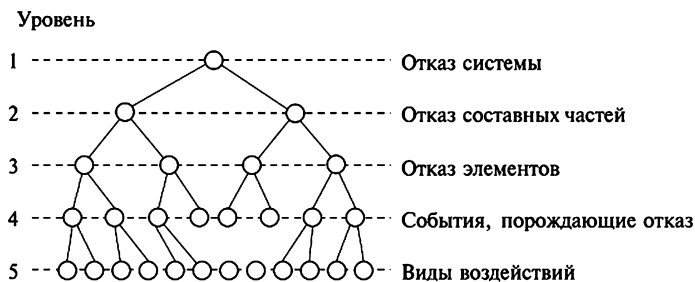


Рис. 9.1  
Граф дерева отказов

по надежности обычно используют либо метод первичных отказов, либо метод вторичных отказов, либо метод иницированных 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 9.1.* 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.

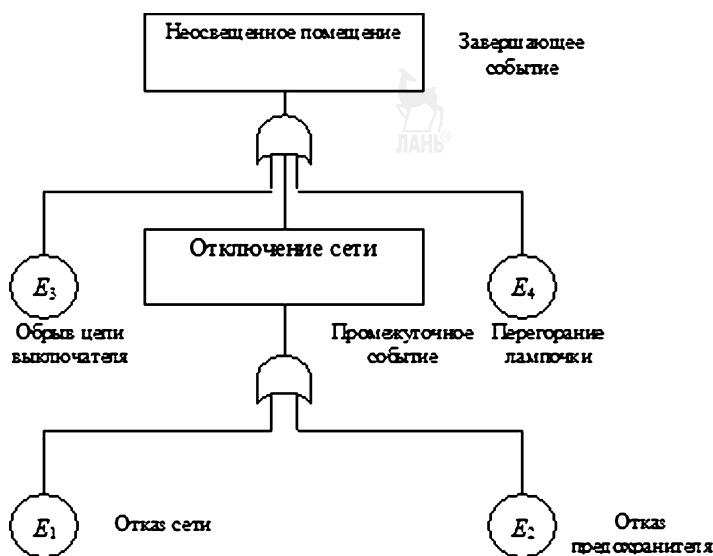


Рис. 9.2  
Дерево неисправностей для случая первичных отказов

Дерево неисправностей для этой системы показано на рисунке 9.2. Основными, или первичными, событиями дерева неисправностей являются:

- 1) отказ источника питания  $E_1$ ;
- 2) отказ предохранителя  $E_2$ ;
- 3) отказ выключателя  $E_3$ ;
- 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 рисунке 9.2, 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).

**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 9.2.* На рисунке 9.3 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 рисунке 9.3, происходят вследствие неудовлетворительного технического обслуживания, неблагоприятного воздействия внешней среды, стихийного бедствия и т. д.

**Метод иницированных отказов.** Подобные отказы возникают при правильном использовании элемента, но в неустановленное время или в неподходящем месте. Другими

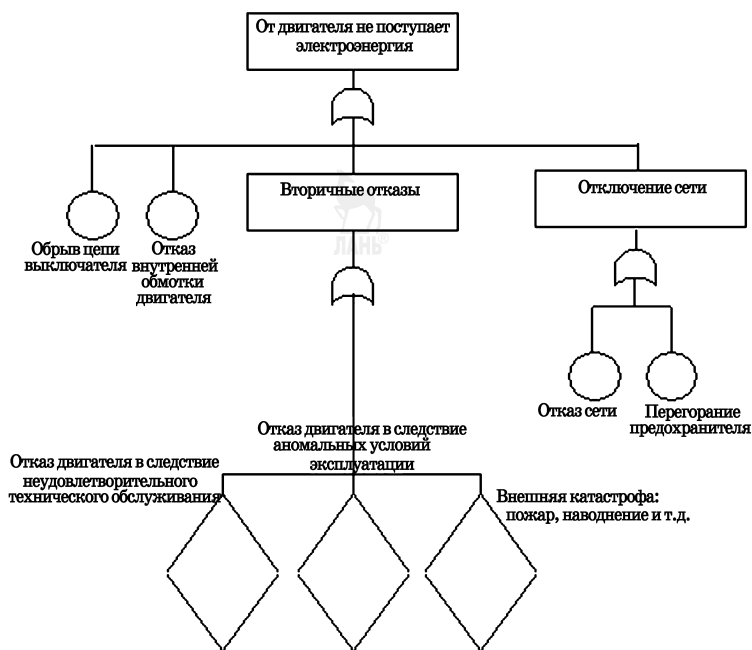


Рис. 9.3  
Дерево неисправностей для случая вторичных отказов

словами, инициированные отказы — это сбои операций координации событий на различных уровнях дерева неисправностей: от первичных отказов до завершающего события (нежелательного либо конечного).

*Пример 9.3.* Типичным примером инициированного отказа является поступление ошибочного сигнала на какое-либо электротехническое устройство (например, двигатель или преобразователь). Взаимосвязь между основными и инициированными отказами показана на рисунке 9.4.

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)

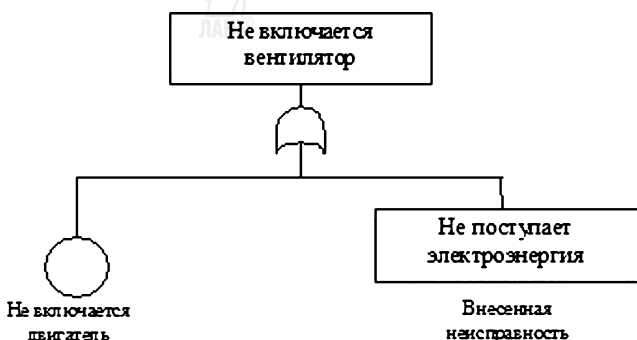


Рис. 9.4  
Дерево неисправностей для случая  
основных и инициированных отказов

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»).

Операция «И» означает, что перед тем, как произойдет некоторое событие А, должно произойти несколько событий, например В и В.

В вероятностном аспекте такая операция выражается логическим произведением:

$$P(A) = P(B) * P(B).$$

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 9.4.* Поражение человека электрическим током может произойти при включении частей его тела в электрическую цепь с достаточной для этого силой тока. Для реализации такого несчастного случая (головное событие — происшествие *L*) необходимо одновременное существование трех необходимых условий (рис. 9.5): условие

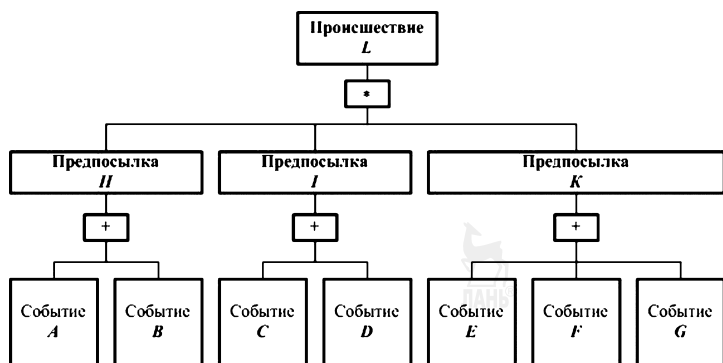


Рис. 9.5  
Дерево причин поражения человека электрическим током

$H$  — наличие потенциально высокого напряжения на корпусе электрической установки; событие  $I$  означает появление человека на токопроводящем основании, соединенном с землей; событие  $K$  — касание какой-либо частью тела человека корпуса электроустановки.

В свою очередь событие  $H$  может быть следствием любого из двух событий — предпосылок  $A$  и  $B$ , где  $A$  — снижение сопротивления изоляции токоведущих частей, а событие  $B$  — касание ими корпуса установки.

Событие  $I$  также обуславливается двумя предпосылками:  $C$  — нахождение человека на токопроводящем основании (полу) и  $D$  — касание человеком заземленных элементов помещения.

Событие  $K$  является результатом появления одной из трех предпосылок:  $E$ ,  $F$  — необходимость ремонта и техобслуживания, а также  $G$  — 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  $L$ . Аналитическое выражение условия реализации рассмотренного несчастного случая имеет вид

$$L = (A + B)(C + D)(E + F + G)$$

или в вероятностной форме

$$P(L) = P(H) \cdot P(I) \cdot P(K) = \\ = [P(A) + P(B)] \cdot [P(C) + P(D)] \cdot [P(E) + P(F) + P(G)].$$

*Пример 9.5.* Во дворе предприятия водитель тягача приступил к сцепке тягача с прицепом, в результате его действий возникла аварийная ситуация (рис. 9.6). Операция осложнилась из-за различной высоты тягача и прицепа, и водитель спустился вниз, чтобы выяснить причи-

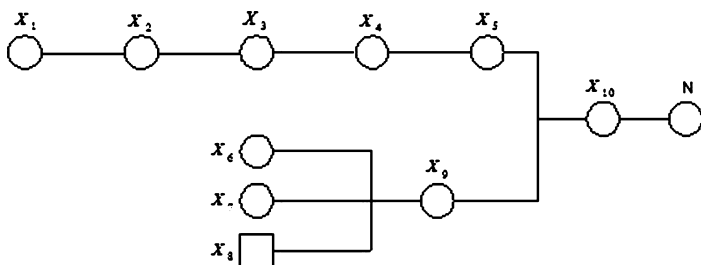


Рис. 9.6

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).

Таблица 9.1

### Результаты анализа происшествия (к примеру 9.5)

Причины несчастного случая	Источники опасности	Предупредительные мероприятия
Двор с уклоном	Неподходящие места стоянки	Реконструкция двора
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

ну, забыв поставить тягач на тормоз. Когда водитель находился между прицепом и тягачом, тягач с работающим двигателем скатился назад по небольшому уклону и придал водителю к раме прицепа.

Анализ происшествия состоит в выяснении причин несчастного случая, выявлении источников опасности и выработке предупредительных мероприятий. Результаты анализа приведены в таблице 9.1.

#### 9.1.4. КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

Излагаемый ниже подход основан на использовании так называемых минимальных сочетаний (сечений) дерева неисправностей.

Такое сочетание (сечение) определяется как множество элементарных событий, приводящих к нежелательному исходу. Если из множества событий, принадлежащих некоторому сочетанию (сечению), нельзя исключить ни одного и в то же время это множество событий приводит к нежелательному исходу, то в этом случае говорят о наличии *минимального аварийного сочетания (сечения)*. Пример качественной оценки дерева неисправностей представлен на рисунке 9.7.

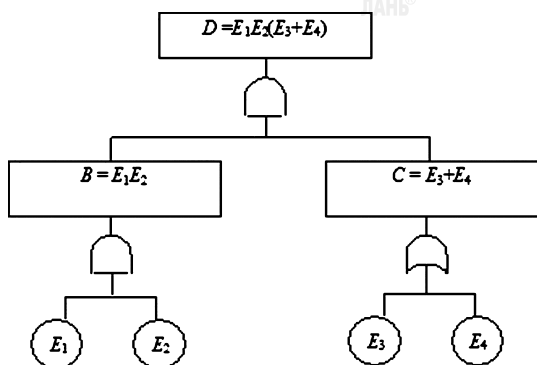


Рис. 9.7

Дерево неисправностей для гипотетического случая

Промежуточный отказ 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  $C$ .

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 (рис. 9.8).

Простое дерево аварий (отказов), характеризующее возникновение пожара на объекте, показано на рисунке 9.8а. Более сложное дерево аварии, описывающее разрыв химического реактора, представлено на рисунке 9.8б.

Исходные события при разрыве реактора следующие: А — закрыт или неисправен предохранительный клапан; Б — открыт клапан подачи окислителя, В — неисправна система блокировки при высокой температуре; Г — малая подача сырья, Д — клапан окислителя открыт и неисправен; Е — неисправна система регулирования расхода окислителя; Ж — увеличено открытие диафрагмы; З — отсутствует напор.

При построении дерева аварий события располагают по уровням. Главное (конечное) событие занимает верхний — 0-й уровень, ниже располагают события 1-го уровня (среди них могут быть и начальные), затем — 2-го уровня и т. д. Если на 1-м уровне содержится одно или несколько начальных событий, объединенных логическим символом «ИЛИ», то возможен непосредственный переход от начального события к аварии.

Для дерева (рис. 9.8б) сочетание событий А, Б, Г, Д — аварийное. При одновременном возникновении этих событий произойдет разрыв реактора.

*Минимальными аварийными сочетаниями (МАС) являются А, Б, Г, так как при этом наборе исходных собы-*

тий возникает событие в вершине дерева. Полная совокупность МАС дерева представляет собой все варианты сочетаний событий, при которых может возникнуть авария. В рассматриваемом «дереве» событие А относится к минимальному отсечному сочетанию, так как если события А не произойдет, то не возникнет и разрыв реактора.

*Минимальные отсечные сочетания* представляют собой события, которые являются критическими для поддержания объекта в безопасном состоянии.

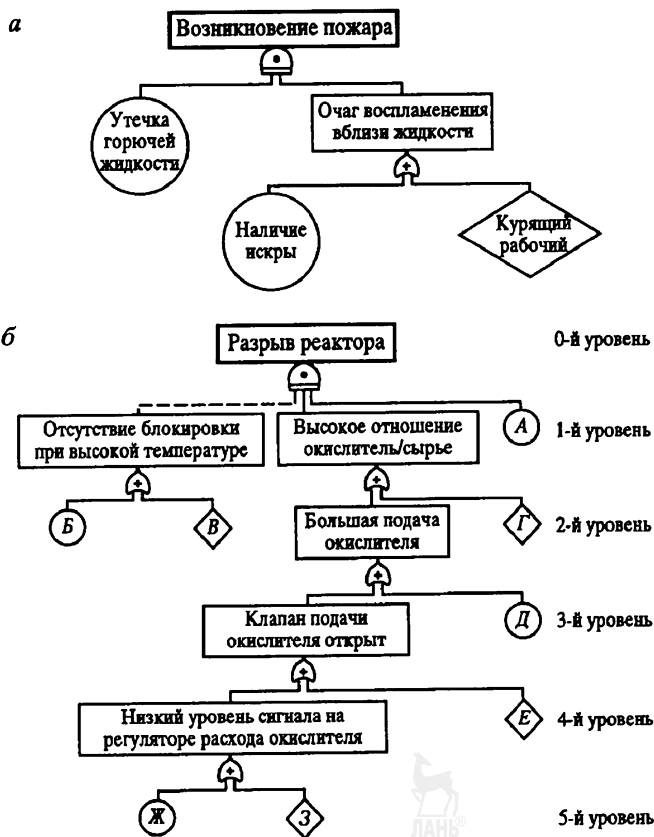


Рис. 9.8  
Дерева аварий (отказов)

Пример дерева отказа, используемого для анализа причин возникновения аварийных ситуаций при автоматизированной заправке емкости приведен на рисунке 9.9.

Структура дерева отказа включает одно головное событие (авария, 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 отказа, представленное на рисунке 9.9, имеет промежуточные события (прямоугольники), тогда как в нижней части дерева кругами с цифрами показаны постулируемые исходные события-предпосылки, наименования и нумерация которых приведены в таблице 9.2.

Анализ дерева отказа позволяет выделить ветви прохождения сигнала к головному событию (в нашем случае на рисунке 9.9 их три), а также указать связанные с ними:

- а) минимальные аварийные сочетания;
- б) минимальные отсечные сочетания.

*Минимальные аварийные сочетания* — это набор исходных событий — предпосылок (отмечены цифрами), обязательное (одновременное) возникновение которых достаточно для появления головного события (аварии).

Для дерева, отображенного на рисунке 9.9, минимальными аварийными сочетаниями, возникновение которых достаточно для появления головного события (аварии), являются:

- {1·2}, {1·3}, {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}.



Таблица 9.2

## Исходные события дерева отказа (см. рис. 9.9)

№ исходного события	Наименование событий или состояний модели	Вероятность события $P_i$
1	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной (ошибка контроля исходного положения)	0,0005
2	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объема дозы	0,00001
3	Ослабление сигнала выдачи дозы помехами (нерасчетное внешнее воздействие)	0,0001
4	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы	0,0002
5	Отказ расходомера	0,0003
6	Отказ датчика уровня	0,0002
7	Оператор не заметил световой индикации о неисправности САВД (ошибка оператора)	0,005
8	Оператор не услышал звуковой сигнализации об отказе САВД (ошибка оператора)	0,001
9	Оператор не знал о необходимости отключения насоса по истечении заданного времени	0,001
10	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении установленного времени заправки	0,004
11	Отказ хронометра	0,00001
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насоса	0,00001
13	Обрыв цепей управления приводом насоса	0,00001

Эти сочетания используются главным образом для выявления слабых мест.

Для данного случая минимальными отсечными сочетаниями, которые гарантируют отсутствие головного события при условии невозникновения ни одного из составляющих этого набора событий, являются сочетания:

{1·2·3·4·5·12·13}, {1·2·3·4·6·12·13}, {7·8·9·10·11·12·13}.

Такие сочетания используются главным образом для определения наиболее эффективных мер предупреждения аварии.

Количественная оценка дерева осуществляется либо статическим моделированием, либо аналитическим методом.

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.

### 9.1.5. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ВЫВОД ДЛЯ ПРОСТЫХ СХЕМ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

Для того чтобы дерево отказов (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 знаком «+». Любой из этих символов показывает объединение событий, связанных со схемой ИЛИ. Математическое описание схем ИЛИ с двумя событиями на входе дано на рисунке 9.10.

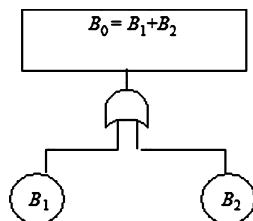


Рис. 9.10  
Схема ИЛИ  
с двумя входами

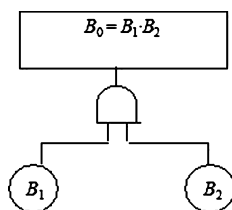


Рис. 9.11  
Схема И  
с двумя входами

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 «∩». Этот символ обозначает пересечение событий. Схема И с двумя входами показана на рисунке 9.11. Событие  $B_0$  на выходе схемы И записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 \cdot B_2.$$

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 рисунке 9.12. В данном случае предполагается, что событие  $A_1$  должно наступить раньше события  $A_2$ .

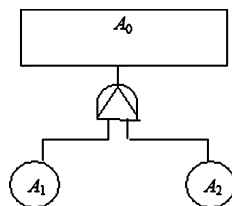


Рис. 9.12  
Приоритетная схема  
И с двумя входами

### 9.1.6. ДЕРЕВО С ПОВТОРЯЮЩИМИСЯ СОБЫТИЯМИ

Характерная конфигурация такого дерева неисправностей показана на рисунке 9.13.

В этом случае дерево неисправностей можно представить с помощью следующих булевых выражений:

$$T = C \cdot B_0, \quad B_1 = A_1 + A_2,$$

$$B_0 = B_1 \cdot B_2, \quad B_2 = A_1 + A_3,$$

Подставляя в первое выражение соотношения для  $B_0$ ,  $B_1$  и  $B_2$ , получаем

$$T = C \cdot (A_1 + A_2) \cdot (A_1 + A_3).$$

Согласно рисунку 9.13 отказ  $A_1$  является повторяющимся элементарным событием, поэтому полученное выраже-

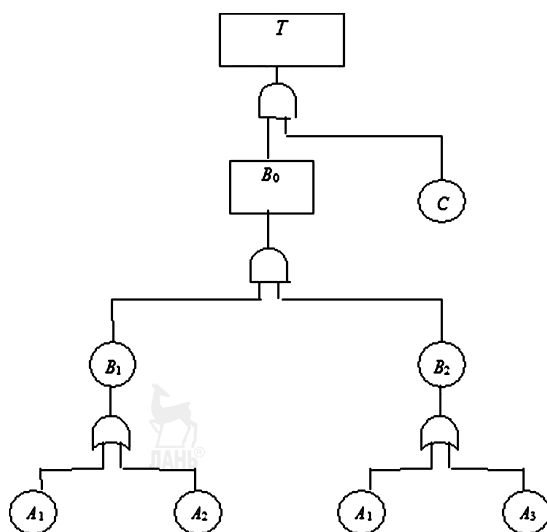


Рис. 9.13  
Дерево отказов в случае повторяющихся событий

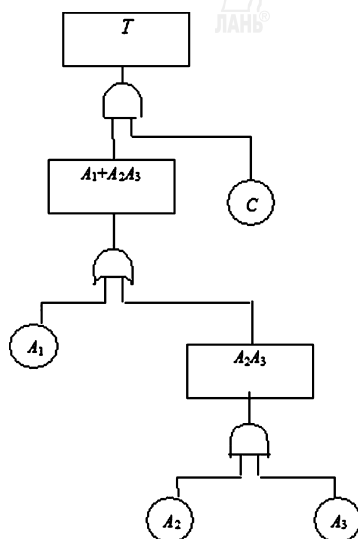


Рис. 9.14  
Упрощенное дерево неисправностей

ние необходимо упростить, используя распределительный закон булевой алгебры.

$A_1, A_2, A_3$  и  $C$  — элементарные события;  $B_1, B_2, B_3$  — промежуточные события;  $T$  — завершающее событие.

В результате получаем

$$T = C \cdot [A_1 + A_2 \cdot A_3],$$

и первоначальное дерево неисправностей (рис. 9.13) принимает вид, показанный на рисунке 9.14.

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.

#### 9.1.7. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

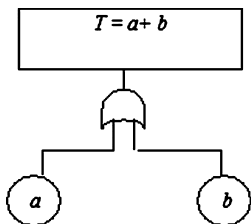


Рис. 9.15  
Схема ИЛИ  
с двумя входами

**Схема ИЛИ.** Для пояснения вероятностного аспекта работы этой схемы проанализируем схему ИЛИ с двумя входами, изображенную на рисунке 9.15.

Для этой схемы вероятность появления завершающего события имеет вид

$$P(T) = P(a) + P(b) - P(ab).$$

Если  $a$  и  $b$  — статистически независимые события и произведение  $P(a) \cdot P(b)$  очень мало, то полученное выражение можно приближенно записать как

$$P(T) \approx P(a) + P(b).$$

В случае схемы ИЛИ с  $n$  входами имеем

$$P(a + b + c + \dots) \approx P(a) + P(b) + P(c) + \dots$$

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.

**Схема И.** В случае схемы И с двумя входами (рис. 9.16) 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

$$P(abc \dots) = P(a) \cdot P(b) \cdot P(c) \dots$$

**Пример 9.6.** Требуется вычислить вероятность появления завершающего события дерева неисправностей, изображенного на рисунке 9.17.

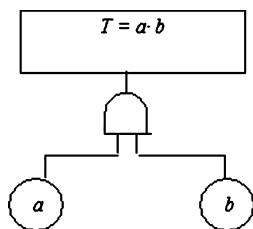


Рис. 9.16  
Схема И  
с двумя входами

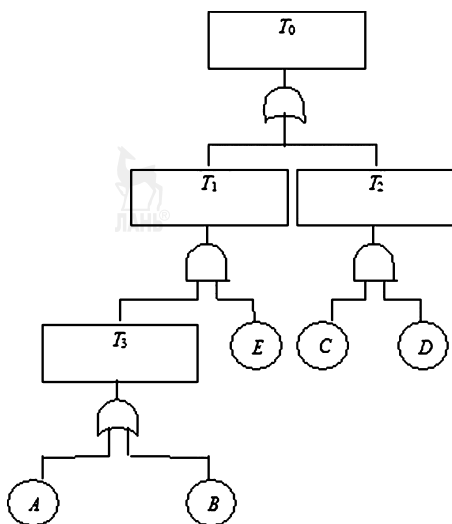


Рис. 9.17  
Гипотетическое дерево событий

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 события, 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.

$$T_0 = T_1 + T_2.$$

Поскольку

$$T_2 = CD, \quad T_1 = T_3E, \quad T_3 = A + B,$$

то

$$T_0 = E(A + B) + CD,$$

и, следовательно,

$$P(T_0) = P(EA + EB + CD).$$

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 9.7.* Допустим, что в дереве неисправностей, изображенном на рисунке 9.17, событие  $E$  заменяется событием  $D$  (рис. 9.18).

Для получения вероятности появления завершающего события нового дерева, изображенного на рисунке 9.18, применим метод 1 из предыдущего примера. Выражение, связывающее завершающее событие с основными событиями (включая повторяющееся событие  $D$ ), имеет вид

$$T_0 = (A + B)D + CD \quad \text{или} \quad T_0 = DA + BD + CD.$$

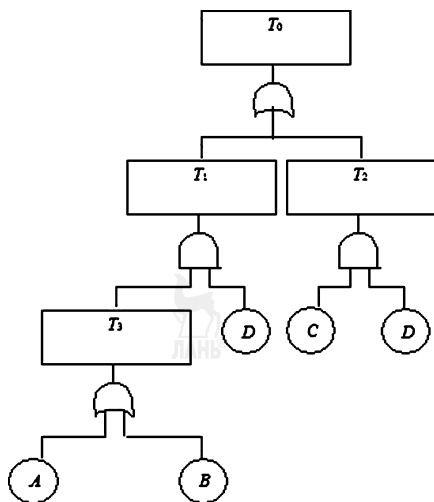


Рис. 9.18

Дерево неисправностей в случае повторяющегося события

Вероятность появления завершающего события определяется по формуле

$$P(DA + BD + CD) = P(DA) + P(BD) + P(CD) - \\ - P(DABD) - P(DACD) - P(BDCD) + P(DABDCD).$$

В случае неповторяющихся статистически независимых событий

$$P(DA + BD + CD) = P(A) \cdot P(D) + P(B) \cdot P(D) + \\ + P(C) \cdot P(D) - P(D) \cdot P(A) \cdot P(B) - P(A) \cdot P(C) \cdot P(D) - \\ - P(B) \cdot P(C) \cdot P(D) + P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D).$$

Следовательно, вероятность появления завершающего события равна

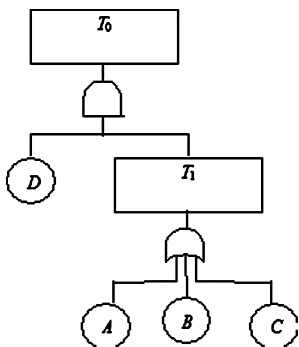


Рис. 9.19  
Дерево неисправностей  
при отсутствии  
повторяющихся событий

$$P(DA + BD + CD) = \\ = 1/16 + 1/16 + 1/16 - 1/64 - \\ - 1/64 - 1/64 + 1/256 = 37/256.$$

Однако если вначале исключаются повторяющиеся события, то дерево неисправностей, представленное на рисунке 9.18, приводится к дереву, показанному на рисунке 9.19. Выражение для завершающего события этого дерева неисправностей принимает вид

$$T_0 = DT_1,$$

где  $T_1 = A + B + C$ .

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

$$P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A) \cdot P(B) - \\ - P(A) \cdot P(C) - P(B) \cdot P(C) + P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) = 37/64.$$

Если вероятности появления элементарных отказов очень малы, существование зависимости событий не вно-

сит большой погрешности в конечный результат. Однако, прежде чем находить окончательное значение вероятности, необходимо попытаться исключить все случаи зависимости событий в дереве неисправностей.

#### **9.1.8. 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 частично-го 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.

#### **9.2. МЕТОД ДЕРЕВА СОБЫТИЙ**

Набор обстоятельств (отказов системы и внешних воздействий на нее), ведущих к аварии, представляет собой последовательность аварии (или сценария), которую можно проследить с помощью дерева событий.

Дерево событий — алгоритм рассмотрения событий, исходящих из основного события (аварийной ситуации).

Дерево событий используется для определения и анализа последовательности (вариантов) развития аварии, включающей сложные взаимосвязи и взаимодействия между техническими системами обеспечения безопасности. Вероятность каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения вероятности основного события на вероятность конечного события.

Методология дерева событий дает возможность:

- 1) описать сценарии аварий с различными последствиями от различных исходных событий;
- 2) определить взаимосвязь отказов систем с последствиями аварии;
- 3) сократить первоначальный набор потенциальных аварий и ограничить его лишь логически значимыми авариями;
- 4) идентифицировать верхние события для анализа дерева отказов.

### 9.2.1. ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВА СОБЫТИЙ

При построении дерева событий используется прямая логика. В отличие от структурных схем и деревьев отказов деревья событий имеют более полное физическое содержание. Если основным преимуществом деревьев отказов по сравнению с блок-схемами является учет причинно-следственных связей между отказами элементов системы, то деревья событий дают картину физических процессов, приводящих элементы и систему к критическим состояниям.

Анализ дерева событий может дать ответ на вопрос: какие аварийные ситуации могут возникнуть и каковы вероятности этих событий?

Последовательности потенциальных событий определяются начиная с исходного события и последующего анализа прочих событий, вплоть до того момента, когда авария либо происходит, либо предотвращается. Полную кар-

тину риска от опасного промышленного объекта дает анализ всех возможных последствий.

Дерево событий обычно рисуется слева направо или сверху вниз и начинается с исходного события. Этим исходным событием является любое событие, которое может привести к отказу какой-либо системы или компонента. В дереве событий исходные события связаны со всеми другими возможными событиями — ветвями, а каждый сценарий представляет собой путь развития аварии, состоящей из набора таких разветвлений.

Определив все исходные события и организовав их в логическую последовательность, можно получить большое число потенциально опасных сценариев аварии. С помощью анализа дерева событий можно определить пути развития аварии, которые вносят наибольший вклад в риск из-за их высокой вероятности или потенциального ущерба.

### 9.2.2. АНАЛИЗ ДЕРЕВА СОБЫТИЙ

*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.

Анализ ветвей и путей развития аварии позволяет вносить изменения в конструкцию или эксплуатационные мероприятия с учетом путей, которые вносят наибольший вклад в суммарный риск.

*Пример 9.8.* 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

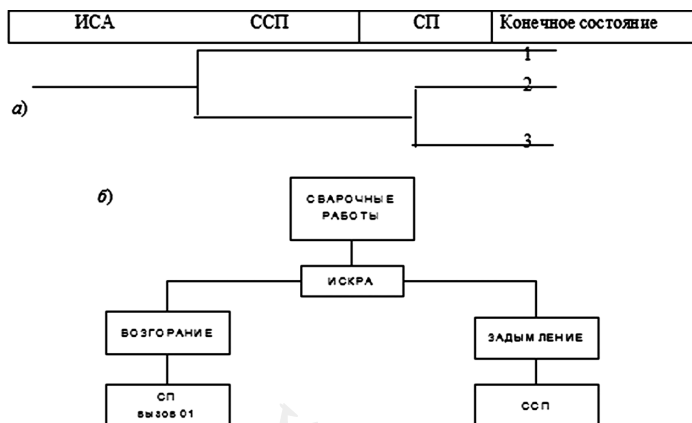


Рис. 9.20

Дерево событий при выполнении сварочных работ:

*a* — принципиальная схема; *б* — диаграмма событий.

событий представлено на рисунке 9.20, где «ступенька» верх означает срабатывание соответствующей системы, а «ступенька» вниз — ее отказ.

Анализ конечных условий показывает, что состояние 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 9.9.** Пример дерева событий для количественного анализа различных сценариев аварий на установке переработки нефти представлен на рисунке 9.21. Цифры рядом с наименованием события показывают условную

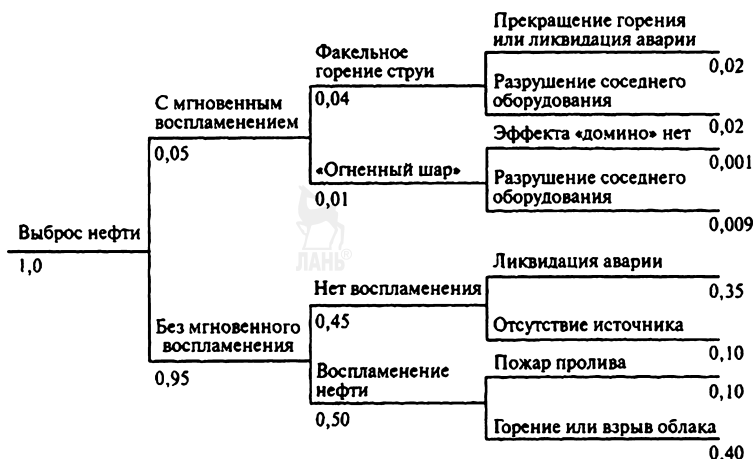


Рис. 9.21

Дерево событий аварий на установке первичной переработки нефти

вероятность возникновения этого события. При этом вероятность возникновения инициирующего события (выброс нефти из резервуара) принята равной единице.

Значение частоты возникновения отдельного события или сценария пересчитывается путем умножения частоты возникновения инициирующего события на условную вероятность развития аварии по конкретному сценарию.

*Пример 9.10.* Путем выполнения ПАО было выявлено, что критической частью реактора, т. е. подсистемой, с которой начинается риск, является система охлаждения реактора. Анализ начинается с составления последовательности возможных событий с момента разрушения трубопровода охладительной установки, т. е. с инициирующего события *A*, вероятность которого равна  $P_A$  (см. рис. 9.22). Далее анализируются возможные варианты развития событий (*B*, *C*, *D* и *E*), которые могут последовать за разрушением трубопровода. На рисунке 9.22 изображено дерево исходных событий, отображающее все возможные варианты.

На первой ветви рассматривается состояние электрического питания. Если питание есть, следующей подвергается

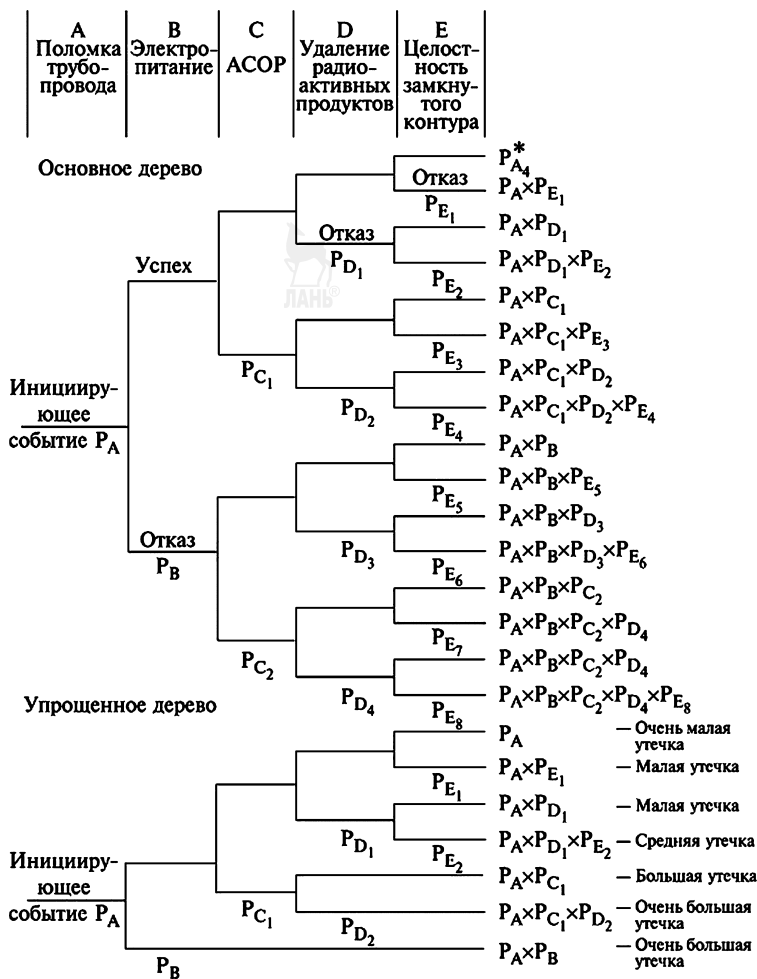


Рис. 9.22

Дерево событий при аварии системы охлаждения реактора

анализу аварийная система охлаждения активной зоны реактора (АСОР). Отказ АСОР приводит к расплавлению топлива и утечкам радиоактивных продуктов.

На практике исходное дерево можно упростить с помощью инженерной логики и свести к более простому де-

реву, изображенному в нижней части рисунка 9.22. В первую очередь представляет интерес вопрос о наличии электропитания с учетом вероятности отказа электропитания  $P_B$ , а также о том, какое действие оказывает этот отказ на другие системы защиты. Если нет электропитания, то другие защитные действия фактически не могут производиться, при этом упрощенное дерево событий не содержит выбора и может произойти утечка, вероятность которой равна  $P_A \times P_B$ . Если электропитание имеется, следующие варианты при анализе зависят от состояния АСОП. Она может работать или не работать, и ее отказ с вероятностью  $P_{C1}$  ведет к последовательности событий, изображенной на рисунке 9.22.

Если система удаления радиоактивных материалов работоспособна, радиоактивные утечки меньше, чем в случае ее отказа. Отказ в общем случае ведет к последовательности событий с меньшей вероятностью, чем в случае работоспособности.

Рассмотрев все варианты дерева, можно получить набор возможных утечек и соответствующие вероятности для различных последовательностей развития аварии (рис. 9.23).

Верхняя линия дерева является основным вариантом аварии реактора. При данной последовательности

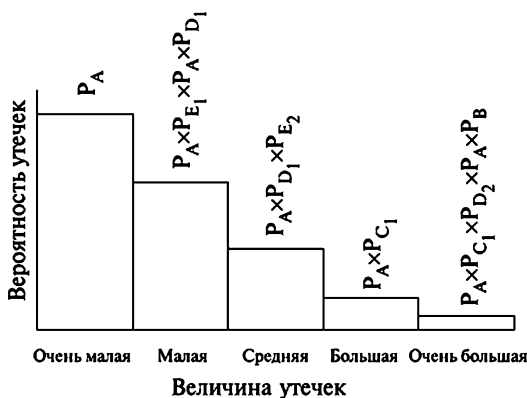


Рис. 9.23

Гистограмма вероятностей для различных величин утечек



Рис. 9.24

Дерево событий при аварии на атомной станции

предполагается, что трубопровод разрушается, а все системы обеспечения безопасности сохраняют работоспособность.

*Пример 9.11.* Пример дерева событий, приведенный на рисунке 9.24, соответствует гипотетической последовательности событий при аварии с потерей теплоносителя в водоохлаждаемом реакторе АЭС.

Начальным событием служит разрыв трубопровода с вероятностью  $H_0$ . Следующие события: пребывание системы электроснабжения и в исправном состоянии с вероятностью  $S_1$ , и в неисправном состоянии с вероятностью  $H_1$ ; срабатывание системы аварийного охлаждения с вероятностью  $S_2$  и несрабатывание с вероятностью  $H_2$ ; срабатывание системы удаления продуктов деления с вероятностью  $S_3$  и несрабатывание с вероятностью  $H_3$ ; сохранение целостности защитной оболочки с вероятностью  $S_4$  и нарушение целостности с вероятностью  $H_4$ .

При развитии событий по верхней ветви дерева (при условии независимости исходных событий) с вероятностью

$$S = H_0 S_1 S_2 S_3 S_4$$

ожидаются очень небольшие радиоактивные выбросы, при развитии по нижним ветвям — большие и очень большие выбросы.

Дерево решений является разновидностью дерева событий. В дереве событий рабочие состояния системы не рассматриваются, так что сумма вероятностей всех событий не равна единице. В дереве решений все возможные состояния системы выражают через состояния элементов, т. е. все состояния системы взаимно увязаны, и их вероятность в сумме должна равняться единице.

Деревья решений могут использоваться, если отказы всех элементов независимы или имеются элементы с несколькими возможными состояниями, а также есть односторонние зависимости. Они не могут использоваться при наличии двусторонних зависимостей и не обеспечивают логического анализа при выборе начальных событий.

*Пример 9.12.* На рисунке 9.25 показана система последовательно соединенных элементов, которая включает насос и клапан, имеющие соответственно вероятности безотказной работы 0,98 и 0,95, а также приведено дерево событий (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.

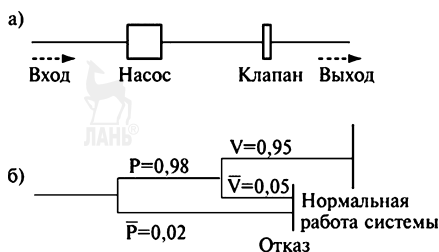


Рис. 9.25

Дерево решений для двухэлементной схемы (работа насоса):

а — принципиальная схема; б — дерево решений.

Таблица 9.3

Таблица решения (к примеру 9.12)


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

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 решения (табл. 9.3).



---



## ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РИСКА ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ



### 10.1. КРИТЕРИИ ПРИЕМЛЕМОГО РИСКА

**В**заимодействие 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 мы будем вынуждены урезать финансирование социальных программ, чем сократим среднюю продолжительность жизни человека и снизим ее качество.

Поэтому 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.

Во всех развитых в промышленном отношении странах существует устойчивая тенденция применения концепции приемлемого риска, но политика России, более чем в других странах, основана на концепции абсолютной безопасности.

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 эко-

номического анализа безопасности, основанный на учете затрат на обеспечение безопасности и потерь от возможных аварий. Концепция нормирования безопасности предполагает задание риска следующим образом:

1) абсолютная безопасность не может быть обеспечена, объект может быть только относительно безопасен;

2) требования к уровню безопасности формируются на основе приемлемого риска, связаны с социально-экономическим состоянием общества и являются производными этого состояния;

3) определение риска осуществляется путем выявления различных факторов, влияющих на безопасность, и их количественной оценки.

Существуют и другие аспекты нормирования безопасности:

1) риск не должен превышать уровня, достигнутого для сложных технических объектов с учетом природных воздействий;

2) риск должен быть снижен настолько, насколько это практически достижимо в рамках соответствующих ограничений;

3) 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 имеются 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 рисунке 10.1.

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.

При определении социально приемлемого риска обычно используют данные о естественной смертности людей.

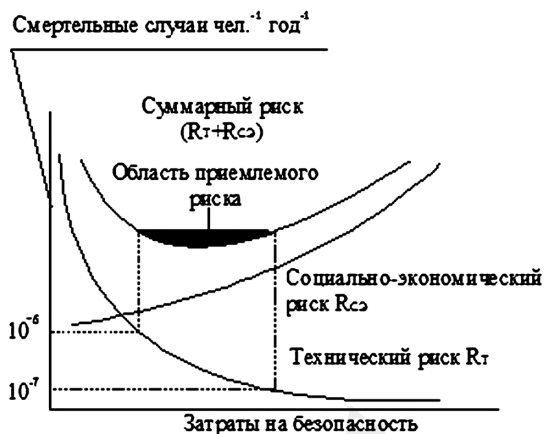


Рис. 10.1  
Определение приемлемого риска

В качестве реперного значения *абсолютного риска* принимают величину летальных исходов (ЛИ):

$$R_A = 10^{-4} \text{ ЛИ}/(\text{чел}\cdot\text{год}).$$

В качестве реперного значения *допустимого (приемлемого) риска* при наличии отдельно взятого источника опасности принимают:

$$R_D = 10^{-5} \text{ ЛИ}/(\text{чел}\cdot\text{год});$$

$$R_D = 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ НС}/(\text{чел}\cdot\text{год}),$$

где НС — случаи нетрудоспособности.

Для населения величина дополнительного риска, вызванного техногенными причинами, не должна превышать реперное значение абсолютного риска:

$$R \leq R_A.$$

Для отдельно взятого источника опасности, учитывая, что индивидуальный риск зависит от расстояния  $R = R(r)$ , условие безопасности можно записать в виде

$$R(r) \leq R_D.$$

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, человеческому фактору) на практике часто используются 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 лише-

ны 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.

## 10.2. 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.

Политика в области управления риском должна строиться в рамках строгих ограничений на воздействие на технические системы и природные экосистемы, состоящих из требований о непревышении величин воздействий предельно допустимых уровней, предельно допустимых

концентраций и предельно допустимых экологических нагрузок на экосистемы.

Основные задачи, решаемые в процессе управления риском, представлены на рисунке 10.2.

Для проведения анализа риска, установления его допустимых пределов в связи с требованиями безопасности и принятия управляющих решений необходимы:

1) наличие информационной системы, позволяющей оперативно контролировать существующие источники опасности и состояние объектов возможного поражения;

2) 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;

3) экспертиза безопасности и сопоставление альтернативных проектов и технологий, являющихся источниками риска;

4) 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;

5) составление рискологических прогнозов и аналитическое определение уровня риска, при котором прекращается рост числа техногенных и экологических поражений;

6) формирование организационных структур, экспертных систем и нормативных документов, предназначенных для выполнения указанных функций и процедуры принятия решений;

7) воздействие на общественное мнение и пропаганда научных данных об уровнях техногенного и экологического рисков с целью ориентации на объективные оценки риска.

Система управления риском предполагает осуществление ряда процессов и действий, реализующих целенаправленное воздействие на риск (рис. 10.3).

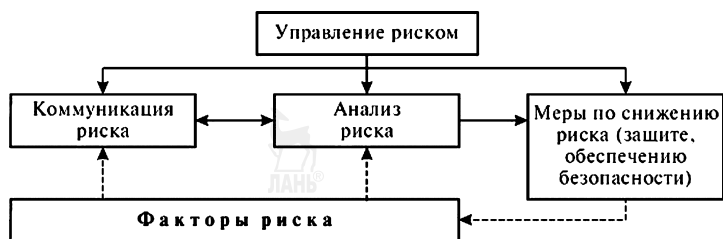


Рис. 10.2  
Содержание задач управления риском

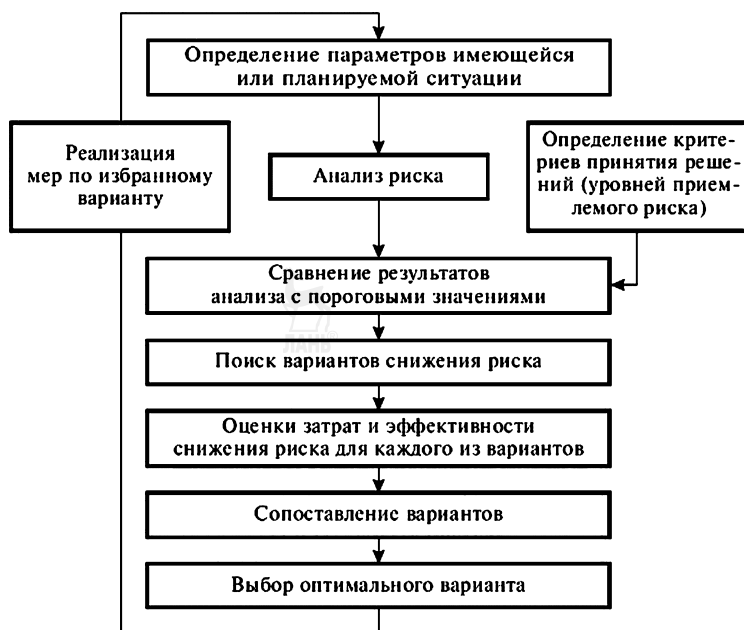


Рис. 10.3  
Схема процесса управления риском

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:

1) выгоды от того или иного вида хозяйственной деятельности;

2) потери, обусловленные использованием вида деятельности;

3) наличие и возможности регулирующих мер с целью уменьшения негативного влияния на среду и здоровье человека.

Процесс сравнения опирается на метод «затраты — выгоды».

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, способствующих 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.

### 10.3. 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 рисунке 10.4.

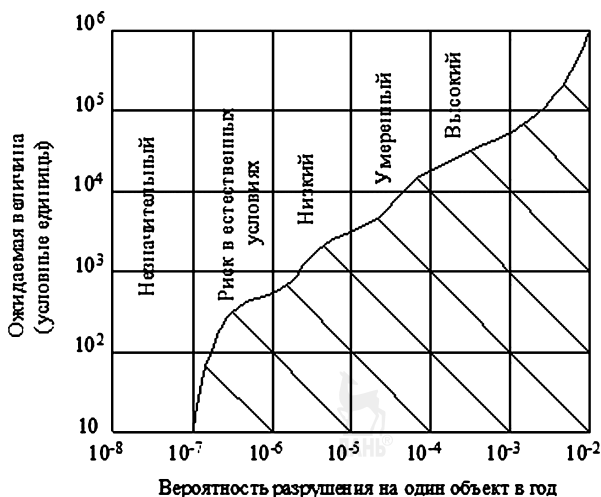


Рис. 10.4  
Зависимость величины риска от затрат

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 который 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

$$F_{rf} = \prod_{i=1}^n (R_i)^i,$$

где  $R_i$  — множитель, характеризующий коэффициент надежности для каждой схемы.

Зависимость между вероятностью  $P$  разрушения, выраженной в процентах, и коэффициентом надежности  $F$  получается в виде

$$P = 10\% - F = 3,5; \quad P = 1\% - F = 10;$$
$$P = 0,1\% - F = 20.$$

Вероятность того, что разрушение произойдет по выбранной последовательности событий  $D$ , вычисляется по формуле

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)^{m_j},$$

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 конст-

рукции 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 удается 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 допускаемого 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 приобретает особое значение 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. Малая 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.

#### 10.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА

В соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.004-91 нормативная вероятность  $Q_B^H$  воздействия опасных факторов пожара (ОФП) не должна превышать  $10^{-6}$  в год в расчете на каждого человека.

В основе вероятностного подхода к оценке пожаро- и взрывоопасности различных объектов, предусмотренного стандартом ГОСТ 12.1.004-91, лежит выражение

$$Q_{\text{офп}} = Q_{\text{п}}(1 - P_{\text{п}})(1 - P_{\text{а}}) \leq Q_{\text{(офп)}}^{\text{н}},$$

где  $Q_{\text{офп}}$  — вероятность достижения в течение года предельных значений опасных факторов пожара (ОФП), год<sup>-1</sup>;  $Q_{\text{п}}$  — вероятность возникновения пожара или взрыва, год<sup>-1</sup>;  $P_{\text{п}}, P_{\text{а}}$  — вероятностная эффективность противопожарных и противовзрывных мероприятий профилактического и активного (например, устройство систем пожаротушения и взрывозащиты) характера соответственно;  $Q_{\text{(офп)}}^{\text{н}} = 10^{-6}$  — нормативная вероятность воздействия на людей ОФП.

Уровень обеспечения безопасности работающих при пожарах отвечает требованиям, если расчетная вероятность воздействия ОФП соответствует соотношению

$$Q_{\text{в}} \leq Q_{\text{в}}^{\text{н}}, \quad Q_{\text{в}} \leq 10^{-6}.$$

Значения предельных величин ОФП, превышение которых с вероятностью выше нормативной не допускается, приведены в таблице 10.1.

Под обрушением конструкций имеются в виду разрушительные последствия при взрывах в зданиях, а также при превышении предела огнестойкости конструкций при пожарах.

Таблица 10.1

Предельные величины опасных факторов пожара

ОФП	Предельная величина
Обрушение конструкций	Недопустимо
Температура, °С	70
Тепловое излучение, Вт/м <sup>2</sup>	500
Содержание СО в воздухе, % об.	0,1
Содержание СО <sub>2</sub> в воздухе, % об.	6
Содержание кислорода, % об.	Не менее 17
Потеря видимости на пожаре, раз	2,4

Вероятность возникновения пожара или взрыва в течение года рассчитывается по формуле

$$Q_{\Pi} = Q_{г.с} \cdot Q_{из},$$

где  $Q_{г.с} = Q_{г} \cdot Q_{о}$  ( $Q_{г}$  — вероятность появления горючего вещества;  $Q_{о}$  — вероятность появления окислителя, обычно  $Q_{о} = 1$ ) — вероятность образования горючей смеси;  $Q_{из} = Q_{т} \cdot Q_{э} \cdot Q_{t}$  ( $Q_{т}$  — вероятность появления теплового источника;  $Q_{э}$  — вероятность достаточности энергии источника;  $Q_{t}$  — вероятность достаточности времени существования источника) — вероятность появления источника зажигания.

Вероятность появления достаточного для образования взрывоопасной смеси количества горючего вещества можно рассчитать по формуле

$$Q_{г} = 1 - e^{-\lambda\tau},$$

где  $\lambda$  — интенсивность отказов оборудования в течение года,  $ч^{-1}$ ;  $\tau$  — общее время работы оборудования в течение года, ч.

Значения  $\lambda$  вычисляются на основе данных о надежности технологического оборудования, которые содержатся в документации на оборудование.

Определение вероятности  $Q_{из}$  производится путем анализа условий появления в соответствующем объекте источника, температура, энергия и время контакта которого с горючей средой достаточны для зажигания.

Оценка величин вероятностей  $P_{\Pi}$  и  $P_{а}$  производится по надежности функционирования соответствующих устройств и систем.

Для эксплуатационных объектов (зданий, сооружений) расчетную вероятность  $Q_{в}$  вычисляют с использованием статистических данных по формуле

$$Q_{в} = \frac{1,5M_{ж}}{T \cdot N_{о}},$$

где  $M_{ж}$  — число жертв пожара в рассматриваемой однотипной группе зданий за период  $T$ ;  $T$  — рассматриваемый

мый период эксплуатации однотипных зданий, год;  $N_0$  — общее число людей, находящихся в здании (сооружении).

Однотипными считаются здания с одинаковой категорией пожарной опасности (А, Б, В, Г, Д), одинакового функционального назначения и с близкими основными параметрами: геометрическими размерами, конструктивными характеристиками, количеством горючей нагрузки, вместимостью (числом людей в здании), производственными мощностями.

Для проектируемых объектов вероятность воздействия ОФП оценивают первоначально по формуле

$$Q_B = Q_{\Pi}(1 - P_{\Pi.з}),$$

где  $Q_{\Pi}$  — вероятность возникновения пожара в здании;  $P_{\Pi.з}$  — вероятность эффективного срабатывания противопожарной защиты, вычисляется

$$P_{\Pi.з} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i),$$

где  $n$  — число технических решений противопожарной защиты зданий;  $R_i$  — вероятность эффективного срабатывания  $i$ -го технического решения, по данным ВНИИПО,  $R_i = 0,7 \dots 0,8$ .

Если не соблюдается условие  $Q_B \leq Q_B^H$ , то необходимо расчет  $Q_B$  выполнять с учетом вероятности  $P_{э}$  эвакуации людей из здания по формулам

$$Q_B = Q_{\Pi}(1 - P_{э})(1 - P_{\Pi.з});$$

$$P_{э} = 1 - (1 - P_{э.п})(1 - P_{дв}),$$

где  $P_{э.п}$  — вероятность эвакуации по эвакуационным путям;  $P_{дв}$  — вероятность эвакуации по наружным эвакуационным лестницам и переходам в смежные секции зданий.

При наличии наружных эвакуационных лестниц и других путей  $P_{дв} = 0,03$ , при отсутствии —  $P_{дв} = 0,001$ .

Вероятность  $P_{э.п}$  вычисляют по зависимости

$$\frac{\tau_{бл} - t_p}{\tau_{н.э}}, \text{ если } t_p < \tau_{бл} < t_p + \tau_{н.э};$$

$$P_{э.п} = 0,999, \text{ если } t_p + \tau_{н.э} \leq \tau_{бл};$$

$$P_{э.п} = 0, \text{ если } t_p \geq \tau_{бл},$$

где  $\tau_{бл}$  — время от начала пожара до блокирования эвакуационных путей, мин; определяется расчетом значений ОФП на эвакуационных путях в различные моменты времени;  $t_p$  — расчетное время эвакуации, мин, определяется как сумма времени движения потока людей по отдельным участкам путей эвакуации;  $\tau_{н.э}$  — интервал времени от возникновения пожара до начала эвакуации людей, мин; при наличии системы оповещения о пожаре  $\tau_{н.э}$  принимают равным времени срабатывания системы с учетом ее инерционности.

При отсутствии необходимых исходных данных для его определения  $\tau_{н.э} = 0,5$  мин, если системы оповещения нет на этаже пожара, для вышележащих этажей  $\tau_{н.э} = 2$  мин, для залов  $\tau_{н.э} = 0$ ;  $\tau_{бл}$  допускается принимать равным необходимому времени эвакуации  $t_{нб}$  (мин), которое зависит от категории пожара, оповещения помещения и его объема (табл. 10.2).

Допускается оценивать уровень обеспечения безопасности работающих в здании по значению вероятности в одном или нескольких помещениях, наиболее удаленных от выходов в безопасную зону (например, верхние этажи).

Таблица 10.2

Время эвакуации  $t_{нб}$ , мин

Категория	Объем помещения, м <sup>3</sup>				
	до 15	30	40	50	60 и более
А, Б	0,5	0,75	1	1,5	1,75
В <sub>1</sub> –В <sub>4</sub>	1,25	2	2	2,5	3
Г, Д	Не ограничивается				

Вероятность возникновения пожара в объекте  $Q_{\Pi}$

$$Q_{\Pi} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_{\Pi.п.i}),$$

где  $n$  — число помещений в объекте;  $Q_{\Pi.п.i}$  — вероятность возникновения пожара в  $i$ -м помещении объекта в течение года.

Вероятность  $Q_{\Pi}$  на объекте определяется вероятностью возникновения пожара в одном  $j$ -м технологическом аппарате  $Q_{\text{а.п.}j}$  или вероятностью пожара непосредственно в объеме  $i$ -го помещения  $Q_{\Pi.о.i}$ :

$$Q_{\Pi} = 1 - \prod_{i=1}^n \left[ (1 - Q_{\Pi.о.i}) \cdot \prod_{j=1}^m (1 - Q_{\text{а.п.}j}) \right],$$

где  $n$  — число помещений в объекте;  $m$  — число технологических аппаратов в помещении.

Вероятности  $Q_{\Pi.о.i}$ ,  $Q_{\text{а.п.}j}$  обусловлены вероятностью совместного образования в объеме помещения или в аппарате горючей смеси  $Q_{\text{Г.с.}i}$ ,  $Q_{\text{Г.с.}j}$  и появлением источника зажигания  $Q_{\text{и.з.}i}$ ,  $Q_{\text{и.з.}j}$ :

$$Q_{\Pi.о.i} = Q_{\text{Г.с.}i} \cdot Q_{\text{и.з.}i};$$

$$Q_{\text{а.п.}j} = Q_{\text{Г.с.}j} \cdot Q_{\text{и.з.}j}.$$

Образование горючей смеси в элементе объекта обусловлено вероятностью совместного появления в нем достаточного количества горючего вещества  $Q_{\text{Г.}i}$ ,  $Q_{\text{Г.}j}$  и окислителя,  $Q_{\text{ок.}i}$ ,  $Q_{\text{ок.}j}$  с учетом параметров состояния (температуры, давления):

$$Q_{\text{Г.с.}i} = Q_{\text{Г.}i} \cdot Q_{\text{ок.}i};$$

$$Q_{\text{Г.с.}j} = Q_{\text{Г.}j} \cdot Q_{\text{ок.}j}.$$

Для производственных помещений можно принять  $Q_{\text{ок.}i} = 1$ .

Вероятность появления горючего вещества определяется вероятностью реализации одной из  $N$  причин нару-

шения технологического процесса  $Q_{н. т. п.}$  (разгерметизация, химическая реакция и т. п.):

$$Q_{г. j} = 1 - \prod_{k=1}^N (1 - Q_{н. т. п.}).$$

Для эксплуатируемых объектов вероятность  $Q_{н. т. п.}$  определяют на основе статистических данных.

Для проектируемых объектов:

$$Q_{н. т. п.} = 1 - e^{-\lambda \cdot \tau},$$

где  $\lambda$  — интенсивность отказов оборудования, 1/час;  $\tau$  — общее время работы оборудования за анализируемый период, ч.

Вероятность появления источника зажигания на объекте:

$$Q_{и. з.} = Q_{т. и.} \cdot Q_{и. э.} \cdot Q_{и. в.},$$

где  $Q_{т. и.}$  — вероятность появления теплового источника;  $Q_{и. э.}$  — вероятность того, что энергия источника достаточна для зажигания горючей смеси;  $Q_{и. в.}$  — вероятность того, что время контакта источника со средой достаточно для ее воспламенения.

*Пример 10.1.* Рассчитать вероятность возникновения пожара от емкостного пускорегулирующего аппарата (ПРА) для люминесцентных ламп на  $W = 40$  Вт и  $U = 220$  В.

Данные для расчета приведены в таблице 10.3.

**Решение.** ПРА является составной частью изделия с наличием вокруг него горючего материала (компаунд, клеммная колодка); произведение вероятностей  $Q$  (ПР)  $\times$   $Q$  (НЗ) обозначим через  $Q(a_i)$ ; тогда можно записать

$$Q_a = Q(B) \left[ \sum_{i=1}^k Q(a_i) \cdot Q(T_i) \right].$$

где  $Q_a$  — нормативная вероятность возникновения пожара при воспламенении аппарата, равна  $10^{-6}$ ;  $Q(B)$  — вероятность воспламенения аппарата или выброса из него пламени при температуре поверхности ПРА (в наиболее нагретом месте), равной или превышающей критическую;

Таблица 10.3

## Результаты испытаний емкостного ПРА (к примеру 10.1)

Температура оболочки в наиболее нагретом месте при работе в аномальных режимах, К			
Параметр	Длительный пусковой режим	Режим с короткозамкнутым конденсатором	Длительный пусковой режим с короткозамкнутым конденсатором
$T$	375	380	430
$\sigma$	6,8	5,16	7,38

$Q(a_i)$  — вероятность работы аппарата в  $i$ -м (пожароопасном) режиме;  $Q_i(T_i)$  — вероятность достижения поверхностью аппарата (в наиболее нагретом месте) критической (пожароопасной) температуры, которая равна температуре воспламенения (самовоспламенения) изоляционного материала;  $k$  — число пожароопасных аномальных режимов работы, характерное для конкретного исполнения ПРА.

Для оценки пожарной опасности проводим испытание на десяти образцах ПРА. За температуру в наиболее нагретом месте принимаем среднее арифметическое значение температур в испытаниях:

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^{10} T_j}{10}.$$

Дополнительно определяем среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{10} (T_j - T_{\text{ср}})^2}{y}}.$$

Вероятность  $Q(T_i)$  вычисляем по формуле

$$Q(T_i) = 1 - \Theta_i,$$

где  $\Theta_i$  — безразмерный параметр, значение которого выбирается по табличным данным, в зависимости от безразмерного параметра  $\alpha_i$  в распределении Стьюдента.

Вычисляем  $\alpha_i$  по формуле

$$\alpha_i = \frac{\sqrt{10}(T_k - T_{cp})}{\sigma},$$

где  $T_k$  — критическая температура.

Значение  $T_k$  применительно для ПРА вычисляем по формуле

$$T_k = \frac{\sum_{j=1}^{10} (T_{д. j} + T_{в. j})}{20},$$

где  $T_{д. j}$ ,  $T_{в. j}$  — температура  $j$ -го аппарата (в наиболее нагретом месте), соответственно при появлении первого дыма и при выходе аппарата из строя (прекращении тока в цепи).

Значение  $Q(B)$  вычисляем в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 при  $n = 10$ .

Значение критической температуры  $T_k$  составило 442,1 К, при этом из десяти испытуемых аппаратов у двух был зафиксирован выброс пламени ( $m = 1$ ,  $Q(B) = 0,36$ ).

Результаты расчета показаны в таблице 10.4.

*Заключение.* Таким образом, расчетная вероятность возникновения пожара от ПРА равна  $Q_{п} = 1(0,06 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 0,006 \cdot 0,00033) \cdot 0,36 = 7,1 \cdot 10^{-7}$ , что меньше  $1 \cdot 10^{-6}$ , т. е. ПРА пожаробезопасен.

Таблица 10.4

Результаты расчета (к примеру 10.1)

Параметр	Длительный пусковой режим ( $i = 1$ )	Режим с короткозамкнутым конденсатором ( $i = 2$ )	Длительный пусковой режим с короткозамкнутым конденсатором ( $i = 3$ )
$Q(a_i)$	0,06	0,1	0,006
$\sigma$	30,9	37,8	4,967
$m$	1	1	0,99967
$Q(T_i)$	0	0	0,00033

### 10.5. ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РИСКА

Промышленная трубопроводная арматура — один из основных элементов, от надежной работы которых в значительной степени зависит безопасная эксплуатация опасных производственных систем (химические, нефтехимические, нефтеперерабатывающие производства, магистральный транспорт, теплоэнергетика и др.). В настоящее время в нормативно-технической документации (НТД) на проектирование, изготовление и эксплуатацию арматуры показатели безопасности (риска) отсутствуют. Не разработаны и методы оценки безопасности, учитывающие специфику арматуры, что не позволяет эффективно оценивать ее промышленную безопасность.

*Безопасность* — это комплексное свойство, зависящее как от свойств изделия, так и от внешних по отношению к нему обстоятельств возникновения опасности. Количественной мерой безопасности естественно считать вероятность того, что интересующее нас событие не произойдет. Эту вероятность обозначим  $S$ . Очевидно, что отказ может произойти:

- а) при штатных условиях эксплуатации;
- б) вследствие возникновения чрезвычайных обстоятельств (выхода из строя других элементов системы, пожара, затопления, землетрясения и т. п.);
- в) из-за неправильной эксплуатации изделия, использования его не по прямому назначению.

Безопасность арматуры — это состояние защищенности жизни, здоровья, имущества, отдельного человека, группы людей, общества и окружающей среды при нормальной эксплуатации арматуры, а также при критических ее отказах на опасных производственных объектах и последствиях таких отказов. Под критическим отказом арматуры понимается отказ, создающий угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды или приводящий к тяжелым экономическим потерям.

Кроме того, и нормально функционирующая арматура иногда служит источником опасности, например движущиеся части арматуры могут травмировать обслуживающий персонал и т. п. Поэтому предлагается ввести следующие показатели безопасности (ПБ) арматуры:

- $a$  — *номинальная*  $S_n$  — безопасность при нормальном функционировании арматуры, ее правильном применении по прямому назначению;
- $b$  — *функциональная*  $S_f$  — безопасность при отказе в процессе нормальной эксплуатации арматуры;
- $c$  — *аварийная*  $S_c$  — безопасность при возникновении чрезвычайных обстоятельств (выход из строя других элементов системы, пожар, затопление, землетрясение и т. п.);
- $d$  — *дисфункциональная*  $S_d$  — безопасность при неправильном использовании арматуры (ошибки обслуживающего персонала) или использовании ее не по прямому назначению.

С другой стороны, безопасность арматуры существенно зависит от того, какие специальные меры и (или) средства защиты предусматриваются при ее применении.

В зависимости от наличия или отсутствия специальных средств (мер) защиты людей, окружающей среды от возможных опасностей, связанных с эксплуатацией арматуры, следует различать:

1) *собственную безопасность*  $p$  — может возникнуть по факторам  $a, b, c, d$  без учета специальных средств (мер) защиты (обозначим такую безопасность путем добавления индекса  $p$  к соответствующему обозначению по пп.  $a, b, c, d$ , например  $S_{np}$  — номинальная безопасность без учета специальных средств (мер) защиты);

2) *комплексную безопасность*  $k$  — может возникнуть по факторам  $a, b, c, d$  с учетом предусмотренных (имеющихся) специальных средств (мер) защиты (обозначим такую безопасность путем добавления индекса  $k$  к соответствующему обозначению по пп.  $a, b, c, d$ , например  $S_{nk}$  — номинальная безопасность с учетом специальных средств (мер) защиты).

Первые четыре понятия  $a, b, c, d$  характеризуют безопасность в зависимости от источника возникновения опасности, связанной с эксплуатацией изделия. Разделение показателей безопасности на собственные и комплексные связано с применением или неприменением на объекте, где установлена арматура, специальных средств (мер), защищающих людей и окружающую среду от возможных опасностей.

Комбинируя факторы  $a, b, c, d$  с факторами  $p$  и  $k$ , получаем систему из восьми показателей безопасности.

В зависимости от того, рассматривается ли безопасность для группы людей, общества и окружающей среды или для отдельного человека (в пересчете на одного человека), следует различать:

1) *интегральную безопасность* — определяется общим ущербом, который может возникнуть по факторам  $a, b, c, d, p, k$ ;

2) *индивидуальную (приведенную) безопасность* — устанавливается ущербом, который может возникнуть по факторам  $a, d, c, p, k$  и который может быть причинен отдельному человеку или в пересчете на одного человека.

Условимся обозначить соответствующий показатель дополнительным индексом  $i$ . Например,  $S_{пр. i}$  — номинальная индивидуальная (приведенная) безопасность без учета специальных средств (мер) защиты. Что касается интегральной безопасности, то она будет определяться по умолчанию отсутствием дополнительного индекса. Например,  $S_{пр}$  — номинальная интегральная безопасность без учета специальных средств (мер) защиты. Очевидно, что понятия интегральной и индивидуальной безопасности могут быть применены к каждому из восьми вышеописанных показателей в зависимости от схемы оценки безопасности: по общему ущербу или в пересчете на одного человека.

Так как потребителя в первую очередь волнует вероятность того, что ничего не произойдет, то целесообразно заменить показатели безопасности на показатели риска

(ПР). Количественной мерой риска будем считать вероятность того, что соответствующее событие произойдет. Эту вероятность обозначим  $R$ . Так как событие либо происходит, либо не происходит, то показатели безопасности связаны с показателями риска соотношением

$$S + R = 1.$$

Понятие риска всегда включает два элемента: частоту, с которой осуществляется опасное событие, и последствия этого события. В нашем случае вероятность возникновения опасного события (риск) есть не что иное, как частота события, а последствия оцениваемого события составляют непосредственное его содержание.

Все положения, оговоренные относительно показателей безопасности, включая систему индексации, распространяются и на показатели риска.

Рассмотрим показатели риска с точки зрения их места в процессе оценки безопасности арматуры, их увязки с показателями, необходимыми для расчета (оценки) безопасности при декларировании объекта, на котором арматура будет применяться (табл. 10.5).

**Риск номинальный собственный.** Приемлемые значения  $R_{np}$  должны быть обеспечены на стадии проектирования арматуры, в том числе должны быть практически исключены возможные опасности:

1) травмоопасность — наличие выступающих частей, острых кромок и концов, которые могут стать причиной ушибов, порезов, а также движущихся частей, требующих защиты от захвата конечностей, отсутствие устойчивости изделия и т. д.;

2) термическая — наличие легкодоступных при эксплуатации частей изделия с высокими или низкими температурами;

3) химическая — наличие материалов, которые могут привести к травмам, вследствие выделения вредных химических веществ;

4) шумовая — недопустимо высокие уровни шума при работе изделия;

Таблица 10.5

## Показатели риска арматуры

Показатели риска (ПР) и их определения	Обозначения ПР	Классифицирующие факторы
<i>Риск номинальный собственный</i> — вероятность того, что при нормальной работе без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{np}$	$a, p$
<i>Риск номинальный комплексный</i> — вероятность того, что при нормальной работе без использования защитных средств (мер) будет причинен ущерб людям и (или) окружающей среде	$R_{nc}$	$a, c$
<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	$R_{fp}$	$b, p$
<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	$R_{fc}$	$b, c$
<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	$R_{ap}$	$c, p$
<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	$R_{ac}$	$c, c$
<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	$R_{dp}$	$d, p$
<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	$R_{dc}$	$d, c$

5) вибрационная — недопустимо высокая вибрация при работе изделия;

6) опасность излучения, распространяющегося от изделия, — наличие радиочастотных, ионизирующих излучений высокой интенсивности и др.

**Риск функциональный собственный.** Для арматуры все виды возможных отказов могут быть заранее оговорены. Так, для запорной арматуры к таким отказам относятся:

- потеря герметичности по отношению к внешней среде, в том числе разрушение корпусных деталей, находящихся под давлением рабочей среды;
- потеря герметичности в затворе;
- невыполнение функции закрытия и открытия;
- самопроизвольное выполнение функции закрытия и открытия;
- необеспечение требуемого времени закрытия (открытия).

В процессе согласования технического задания на проектирование изделия, исходя из конкретных условий эксплуатации, должно быть оговорено, какие из вышеперечисленных отказов являются критическими. Для этих отказов и должно быть обеспечено приемлемое значение  $R_{fp}$ .

**Риск аварийный собственный.** Как правило, на стадии согласования ТЗ на проектирование заказчик оговаривает возможные нештатные ситуации (уровень сейсмических воздействий, пожары, наводнения и т. п.) и вызываемые этими ситуациями критические отказы, перечень которых в общем случае может не совпадать с перечнем критических отказов, возникающих в нормальных условиях эксплуатации. Например, при пожаре фторопластовые детали начинают выделять фосген, который является источником соответствующей опасности. На основе этого перечня в процессе проектирования и отработки изделий обеспечивается приемлемое значение  $R_{cp}$ .

**Риск дисфункциональный собственный.** Исходя из анализа многолетних данных по эксплуатационной статистике, с заказчиком согласовывается перечень возможных ошибок обслуживающего персонала при эксп-

луатации изделий, ведущих к возникновению критических отказов. На основе этого перечня за счет конструктивных мер («защита от дурака») в процессе проектирования и обработки изделий обеспечивается приемлемое значение  $R_{dp}$ .

В случае, когда в процессе проектирования и обработки изделий не удастся обеспечить приемлемые уровни рисков, в нормативной документации должны быть даны указания о мерах предупреждения возможности нанесения ущерба здоровью людей и (или) окружающей среде и необходимых действиях при возникновении опасных ситуаций. Если указанные мероприятия рассматриваются как недостаточные или их использование может сделать изделие непригодным для употребления, то надо указать на применение средств защиты, независимых от данного изделия, или же личных средств защиты. В этом случае должны использоваться комплексные показатели риска  $R_{fc}$ ,  $R_{cc}$ ,  $R_{dc}$ , рассчитанные исходя из представленных разработчиком арматуры значений собственных рисков  $R_{fp}$ ,  $R_{cp}$ ,  $R_{dp}$ , и эффективности защиты, обеспечиваемой разработчиком системы.

## 10.6. 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. 10.6) 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 обоснованно полагать, что в значительной мере указанные опасности будут проявляться совместно, т. е.

Таблица 10.6

## Причины пожаров на объектах хранения нефтепродуктов

Причины пожара	Количество пожаров	Процент от общего количества пожаров	Число погибших людей	Процент от общего числа погибших людей
Установленные поджоги	7	3,1	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
Самовозгорание 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.

Таблица 10.7

## Опасности технологического процесса и оборудования

Технологическая операция	Функциональный блок (сооружение, оборудование, помещение)					
	СНЭ	ПНС	ТТ	РП	Л	ПХ
Слив, зачистка, налив (железнодорожные цистерны)	В, П, О, З					
Перекачка СНП		В, П, О, З	В, П, О, З			
Хранение СНП				В, П, О, З		
Ремонт резервуаров				ВО		
Отбор проб, проведение замеров уровня СНП	В, П, 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 СИП, отобранных для анализа.

взрыв будет сопровождаться пожаром, отравлением персонала и загрязнением ОПС. 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 таблице 10.7 приведены эти опасности в зависимости от стадии технологического процесса и оборудования.

При анализе риска опасных промышленных объектов допускаются самые разнообразные методы, в том числе и экспертные процедуры. В основе последних лежат субъективные оценки, опирающиеся на известную экспертизу информацию. Работа с априорной информацией представляет особую разновидность вероятностных процедур, включая субъективные (персональные) вероятности.

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 сопровождались гибелью 19 человек. Отсюда можно в первом приближении определить, что человеческая жизнь приходилась на 12 по-

жаров. Считая, что вероятность взрывов и пожаров с участием бензина равна 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  $Q_B$ , надо знать вероятности исходных событий — образования парогазовой смеси  $Q_{2.1}$  и появления источника воспламенения  $Q_{2.2}$ . Для определения вероятности первого исходного события  $Q_{2.1}$  можно использовать данные для показателей, формирующих коэффициент  $K_1$  (частные факторы взрывоопасности), приведенные в таблице 10.8.

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 один-два 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 их практически не образует (табл. 10.8).

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  $Q_{3.13} = 0,4$ ). В этом случае для модели оценки вероятности взрыва бензина он составит  $0,4 \cdot 0,4 = 0,16$ . Иначе говоря, один случай из

Таблица 10.8

## 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	0,01	0,01
Давление среды (избыточное)	0	0
Плотность газа (пара) по отношению к плотности воздуха	0,1	0,1
Объемное электрическое сопротивление	0,06	0,06
Особо опасные характеристики	0	0

шести может закончиться взрывом. Для осветительного керосина эта величина на порядок меньше (0,016), т. е. только один случай из 60 будет сопровождаться взрывом.

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)  $Q_{3.13} = 0,4$ ; другие источники  $Q_{3.14} = 0,1$ . 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.

### 10.7. ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ

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 неопределенностью в величинах как ущерба, так и вероятности. Векторы, как правило, неравномерно распределены в пространстве и во времени.

Под *ущербом* понимаются фактические и возможные экономические потери и (или) ухудшение природной среды вследствие изменений в окружающей человека среде.

Ущерб можно классифицировать по различным признакам. На рисунке 10.5 приведена классификация применительно к последствиям происшествия: по месту и времени проявления последствий относительно воздействия негативных факторов; в зависимости от решаемой задачи; по объектам воздействия негативных факторов происшествий; размеру ущерба.

При рассмотрении экономических, социальных и экологических сторон тяжелой аварии или катастрофы целесообразно оперировать понятиями прямого, косвенного и полного ущербов (рис. 10.6).

Под *прямым ущербом* в результате аварии или чрезвычайной ситуации (ЧС) понимают непосредственные потери и убытки всех структур экономики, попавших в зоны

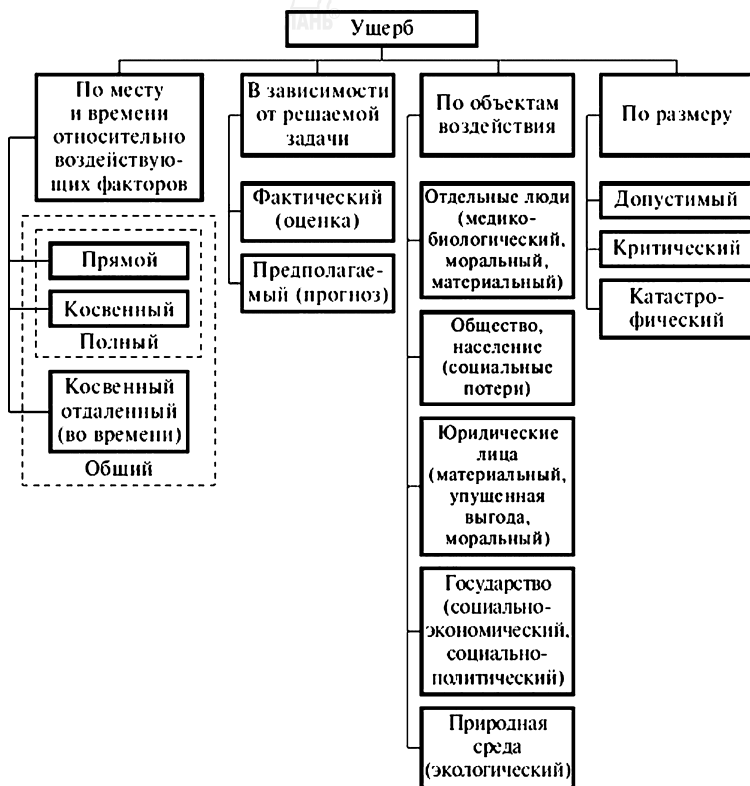


Рис. 10.5  
Классификация видов ущерба от происшествий

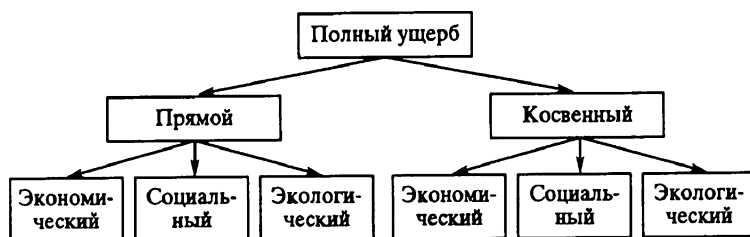


Рис. 10.6  
Структура полного ущерба

воздействия аварии или катастрофы. При рассмотрении структуры прямого ущерба выделяют прямой экономический, прямой социальный и прямой экологический ущербы.

*Косвенный ущерб* от происшествия включает потери, убытки, упущенную выгоду, понесенные вне зоны прямого воздействия аварии или ЧС. Как и прямой ущерб, косвенный делится на экономический, социальный и экологический ущербы. Как показывает практика, косвенные убытки часто во много раз превышают размер прямых, т. е. размер прямых убытков — это лишь вершина айсберга (рис. 10.7).

В таблице 10.9 приведены зарубежные данные по величине экономического ущерба в зависимости от вида аварии в области добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья.

При оценке ущерба от негативного происшествия большую роль играют вероятностные оценки опасности.

Вероятность возникновения опасности — величина, существенно меньшая единицы. Кроме того, точки реализации опасности распределены в пространстве и во времени. Это значит, что, например, вероятность взрыва одной АЭС в стране гораздо выше, чем вероятность одновре-



Рис. 10.7  
Соотношение прямого и косвенного ущербов

Таблица 10.9

**Распределение экономических потерь (%) по типам аварий на различных предприятиях**

Предприятия	Типы аварий			
	Взрывы	Пожары	Взрывы облаков	Другие
Нефтеперерабатывающие заводы	15	48	31	6
Нефтехимические заводы	46	17	37	0
Терминалы	22	44	28	6
Газоперерабатывающие заводы	0	40	60	0
Прочие объекты	7	50	36	7

менного взрыва всех электростанций страны за одно и то же время. Или вероятность пяти подряд неурожайных лет гораздо ниже одного неурожайного года. Чем больший отрезок времени и количество рискующих субъектов берутся при анализе, 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 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.

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:

$$R = P \cdot X.$$

По отношению к источникам опасностей оценка риска предусматривает разграничение нормального режима работы  $R_n$  и аварийных ситуаций  $R_{ав}$ :

$$R = R_n + R_{ав} = P_n \cdot X_n + P_{ав} \cdot X_{ав}.$$

В случае, когда последствия неизвестны, то под риском понимают вероятность наступления определенного сочетания нежелательных событий:

$$R = \sum_{i=1,n} P_i.$$

При необходимости можно использовать определение риска как вероятности превышения предела  $x$ :

$$R = P\{\xi > x\},$$

где  $\xi$  — случайная величина.

Техногенный риск оценивают по формуле, включающей как вероятность нежелательного события, так и величину последствий в виде ущерба  $U$ :

$$R = P \cdot U.$$

Если каждому нежелательному событию, происходящему с вероятностью  $P_i$ , соответствует ущерб  $U_i$ , то величина риска будет представлять собой ожидаемую величину ущерба  $U_*$ :

$$R = U_* = \sum_{i=1,n} P_i U_i.$$

Если все вероятности наступления нежелательного события одинаковы ( $P_i = P$ ,  $i = 1, n$ ), то следует

$$R = P \sum_{i=1,n} U_i.$$

Когда существует опасность здоровью и материальным ценностям, риск целесообразно представлять в векторном виде с различными единицами измерения по координатным осям:

$$\vec{R} = \vec{P} \cdot \vec{U}.$$

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:

$$R = \frac{U_*}{M \cdot T}.$$

Общий риск для группы людей (коллективный риск)

$$R = \frac{U_*}{T}.$$

*Пример 10.2.* Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия в технической системе, состоящей из трех подсистем, с независимыми отказами. Вероятности отказов подсистем, 1/год:

$$P_1 = 10^{-3}, \quad P_2 = 10^{-4}, \quad P_3 = 10^{-2},$$

ожидаемые ущербы от отказов подсистем:

$$U_1 = 10 \cdot 10^6 \text{ руб.}, \quad U_2 = 50 \cdot 10^6 \text{ руб.}, \quad U_3 = 5 \cdot 10^6 \text{ руб.}$$

**Решение.** Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы как ожидаемую величину ущерба:

$$\begin{aligned} R = U &= \sum_{i=1}^3 P_i U_i = P_1 U_1 + P_2 U_2 + P_3 U_3 = \\ &= 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^6 + 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^6 + 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^6 = 65 \text{ 000 руб.} \end{aligned}$$

*Пример 10.3.* Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия в технической системе, состоящей из пяти подсистем с независимыми равновероятными отказами  $P = 10^{-2}$  1/год. Ожидаемые ущербы от отказов подсистем:

$$\begin{aligned} U_1 &= 5 \cdot 10^6 \text{ руб.}, \quad U_2 = 10 \cdot 10^6 \text{ руб.}, \quad U_3 = 20 \cdot 10^6 \text{ руб.}, \\ U_4 &= 15 \cdot 10^6 \text{ руб.}, \quad U_5 = 25 \cdot 10^6 \text{ руб.} \end{aligned}$$

**Решение.** Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы с равновероятными отказами подсистем как ожидаемую величину ущерба:

$$R = U = P \sum_{i=1}^5 U_i = P(U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5) = \\ = 10^{-2}(5 + 10 + 20 + 15 + 25)10^6 = 750\,000 \text{ руб.}$$

*Пример 10.4.* Рассматриваются два варианта системы энергоснабжения объекта. Вероятность аварии для первого составляет  $P_1 = 10^{-1}$  1/год, а второго —  $P_2 = 10^{-3}$  1/год. Возможный ущерб в случае аварии первой системы составляет  $U_1 = 2$  млн руб., а второй —  $U_2 = 100$  млн руб. Какой проект предпочтительнее с точки зрения безопасности?

**Решение.** Экономический риск при эксплуатации первой системы составляет:

$$R_1 = P_1 U_1 = 10^{-1} \text{ аварий/год} \times 2 \text{ млн руб./аварию} = \\ = 200 \text{ тыс. руб./год.}$$

Соответственно для второго варианта:

$$R_2 = P_2 U_2 = 10^{-3} \text{ аварий/год} \times 100 \text{ млн руб./аварию} = \\ = 100 \text{ тыс. руб./год.}$$

Так как  $R_2 < R_1$ , то второй вариант предпочтительнее.

Аварии экологически опасных (природоохранных) объектов обычно являются завершением ряда цепочек событий. В их начале находятся нежелательные события вне и внутри объекта, а иницирующими событиями являются срабатывания или отказы элементов и систем объекта, обслуживающего персонала и другие события.

Для определения эколого-экономического риска от аварии на экологически опасном объекте представим эксплуатацию объекта в виде древовидного ориентированного графа (рис. 10.8) на основе дерева событий, исходными событиями которого являются иницирующие события для аварии  $A_p$  ( $p = 1, \dots, q$ ), а главными (вершинными) событиями  $B_k$  ( $k = 1, \dots, l$ ) — возможные последствия.

Исходные события  $A_p$  ( $p = 1, \dots, q$ ) для рассматриваемого объекта:  
внешние и внутренние иницирующие события

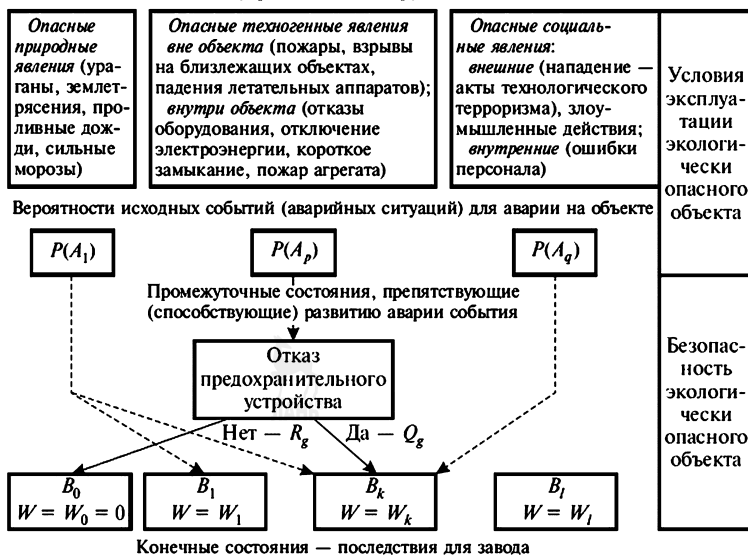


Рис. 10.8

Граф дерева событий при эксплуатации экологически опасного объекта

Пусть  $B_0$  — событие, состоящее в нормальном функционировании экологически опасного объекта (ущерб  $W_0 = 0$ ), а  $B_k$  ( $k = 1, \dots, l$ ) — событие, состоящее в переходе объекта из-за различных исходных событий в состояние, характеризующее негативными последствиями для предприятия, оцениваемыми ущербом  $W_k$  ( $k = 1, \dots, l$ ). Таким образом, состояние объекта можно описать  $(l + 1)$ -мерным вектором  $z$ , принимающим значения от 0 (нормальное функционирование) до  $l$  (последствия  $l$ -го типа). Каждый сценарий развития аварии приводит к различному ущербу.

В общем случае эколого-экономический риск вычисляется по формуле:

$$R = \sum_{k=1}^l P(B_k) \cdot W_k,$$

где  $P(B_k) = Q_k$  — вероятность развития аварии по  $k$ -му каналу.

Для случая, приведенного на рисунке 10.8, получим

$$P(B_k) = P(A_p)Q_g,$$

где  $Q_g$  — вероятность реализации инициирующих событий (отказа предохранительного устройства).

Эта вероятность при всех возможных исходных событиях вычисляется по формуле

$$Q_k = \sum_{p=1}^q P(A_p)Q_{pk},$$

где  $P(A_p)$  — вероятность наступления инициирующего события  $p$ -го типа в расчете на год;  $Q_{pk}$  — вероятность развития аварии по  $k$ -му каналу в результате  $p$ -го исходного события (вычисляется как произведение вероятностей всех инициирующих событий).

Тогда с учетом этого риск можно вычислить по формуле

$$R = \sum_{p=1}^q P(A_p) \cdot Q_{pk} \sum_{k=1}^l W_k.$$

---



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ



1. Закон РФ от 21.07.97 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
2. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. — Взамен ГОСТ 12.1.004-85 ; введ. 1991-06-14.
3. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования. — Введ. 1976-06-28.
4. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. — Взамен ГОСТ 18322-73 ; введ. 1978-11-15.
5. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. — Введ. 1989-11-15.
6. ГОСТ Р 51344-99. Безопасность машин. Принципы оценки и определения риска. — Введ. 1999-11-22.
7. ГОСТ Р 51897-2002. Менеджмент риска. Термины и определения. — Введ. 2002-05-30.
8. ГОСТ Р 51901.11-2005. Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство. — Введ. 2005-09-30.
9. ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. — Введ. 2002-06-07.
10. ГОСТ Р 51901.13-2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. — Введ. 2005-05-31.
11. ГОСТ Р 51901.14-2005. Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности. — Введ. 2005-05-31.
12. ГОСТ Р 51901-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. — Введ. 2002-06-07.
13. *Авдотьин, В. П.* Экономическая безопасность в техногенной и природной сфере в условиях чрезвычайных ситуаций // Экспресс-информ. «Промышл. и с.-х. комплексы, здания и сооруж.». — 2001. — Вып. 1. — С. 1-15.

14. Надежность и эффективность в технике: Справочник / Под ред. В. С. Адуевского. — М. : Машиностроение, 1989.
15. *Акимов, В. А.* Методический аппарат исследования природного и техногенного рисков / В. А. Акимов, Н. Н. Радаев // Безопасность жизнедеят-ти. — 2001. — № 2. — С. 34–38.
16. *Акимов, В. А.* Надежность технических систем и техногенный риск / В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов [и др.]. — М. : ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.
17. *Акимов, В. А.* Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах : учеб. пособие / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев. — М. : Дел. экспресс, 2004.
18. *Акимов, В. А.* Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев ; МЧС России. — М. : Дел. экспресс, 2004.
19. *Акимова, Т. А.* Экология : Природа — Человек — Техника / Т. А. Акимова, А. П. Кузьмин, В. В. Хаскин. — М. : ЮНИТИ, 2001.
20. *Александровская, Л. Н.* Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов [и др.]. — М. : Логос, 2003.
21. *Алымов, В. Т.* Техногенный риск. Анализ и оценка : учеб. пособие / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2005.
22. *Баратов, А. Н.* Пожарная безопасность / А. Н. Баратов, В. А. Пчелинцев. — М. : АСВ, 1997.
23. Безопасность жизнедеятельности / под ред. С. В. Белова. — М. : Высш. шк., 2005.
24. *Белов, П. Г.* Моделирование опасных процессов в техносфере. — М. : Изд-во Академии гражданской защиты МЧС РФ. 1999.
25. *Беляев, Ю. К.* Надежность технических систем : справ. / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин [и др.]; под ред. И. А. Ушакова. — М. : Радио и связь, 1985.
26. *Болотин, В. В.* Ресурс машин и конструкций. — М. : Машиностр., 1990.
27. *Ветошкин, А. Г.* Надежность и безопасность технических систем : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин, В. И. Марунин. — Пенза : Изд-во ПГУ, 2003.
28. *Владимиров, В. А.* Оценка риска и управление техногенной безопасностью / В. А. Владимиров, В. И. Измалков, А. В. Измалков. — М. : Дел. экспресс, 2002.
29. *Гражданкин, А. И.* К вопросу об оценке риска при декларировании промышленной безопасности опасных производ-

- ственных объектов / А. И. Гражданкин, А. А. Федоров // Безопасность жизнедеят-ти. — 2001. — № 4. — С. 2–6.
30. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. — М. : Мир, 1984.
31. Иванов, Б. С. Оценка риска на промышленном предприятии / Б. С. Иванов, Д. Ю. Богомолов // Безопасность труда в пром-сти. 1999. — № 9. — С. 40–42.
32. Иванов, Е. А. О номенклатуре показателей риска для решения задач нормирования и оценки безопасности промышленной трубопроводной арматуры / Е. А. Иванов, Ю. И. Тарасьев, В. Л. Шпер // Безопасность труда в пром-сти. — 2000. — № 10. — С. 38–40.
33. Инженерная психология / под ред. Б. Ф. Ломова. — М. : Высш. шк., 1986.
34. Карлин, Л. Н. Управление энвиронментальными и экологическим рисками / Л. Н. Карлин, В. М. Абрамов. — СПб. : РГГМУ, 2006.
35. Мазур, И. И. Инженерная экология. Общий курс : в 2 т. / И. И. Мазур, О. И. Молдаванов, В. Н. Шипов. — М. : Высш. шк., 1996.
36. Мартынюк, В. Ф. Анализ риска и его нормативное обеспечение // Безопасность труда в пром-сти / М. В. Лисанов, Е. В. Кловач, В. И. Сидоров. — 1995. — № 11. — С. 55–62.
37. Онищенко, В. Я. Классификация и сравнительная оценка факторов риска / В. Я. Онищенко // Безопасность труда в пром-сти. — 1995. — № 7. — С. 23–27.
38. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность / под ред. А. Н. Баратова. — М. : Химия, 1987.
39. Проников, А. С. Надежность машин. — М. : Машиностр., 1978.
40. РД 03-315-99. Положение о порядке оформления декларации промышленной безопасности и перечне сведений, содержащихся в ней. — Утв. Постановл. Госгортехнадзора России от 07.09.1999 г. № 66 ; введ. 1999–09–07 ; зарег. в Минюсте РФ 1999–10–07 № 1926.
41. РД 03-357-00. Методические рекомендации по составлению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта. — Утв. Постановл. Госгортехнадзора РФ от 26.04.2000 г. № 23 ; введ. 2000–04–26.
42. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. — Утв. Постановл. Госгортехнадзора России от 10.07.2001 г. № 30 ; введ. 2001–09–01.
43. РД 03-496-02. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах. —

- Утв. Постановл. Госгортехнадзора России от 29.10.2002 г. № 63 ; введ. 2002–10–29.
44. *Роздин, И. А.* Оценка риска аварий на предприятиях по хранению светлых нефтепродуктов методом построения деревьев опасности / И. А. Роздин, Е. И. Хабарова // *Безопасность труда в пром-сти.* — 2000. — № 10. — С. 20–23.
  45. *Синицын А. П.* Расчет конструкций на основе теории риска. — М. : Стройиздат, 1985.
  46. СНиП 21-01-97. Строительные нормы и правила. Пожарная безопасность зданий и сооружений. — Взамен СНиП 2.01.02-85\* ; введ. 1998–01–01.
  47. СП 12-132-99. Безопасность труда в строительстве. Макеты стандартов предприятий по безопасности труда для организаций строительства, промышленности строительных материалов и жилищно-коммунального хозяйства. — Введ. 1999–07–01.
  48. Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование : справ. / под ред. С. В. Белова. — М. : Машиностр., 1989.
  49. *Труханов В. М.* Надежность изделий машиностроения. Теория и практика. — М. : Машиностр., 1996.
  50. *Хенли, Э. Дж.* Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. — М. : Машиностр., 1984.
  51. Экология : учеб. пособие / С. А. Боголюбов, М. А. Геталова, Е. М. Беленков и др. ; под ред. С. А. Боголюбова. — М. : Знание, 1997.
  52. ГОСТ Р 12.3.047-98. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. — Введен 2000–01–01.





## ОГЛАВЛЕНИЕ



<b>Введение</b> .....	4
<i>Глава первая</i>	
<b>Основные понятия безопасности технических систем</b> .....	7
<i>Глава вторая</i>	
<b>Понятия и показатели надежности технических систем</b> .....	13
<i>Глава третья</i>	
<b>Математические зависимости для оценки надежности</b> .....	21
3.1. Функциональные зависимости надежности .....	21
3.2. Теорема сложения вероятностей .....	27
3.3. Теорема умножения вероятностей .....	30
3.4. Формула полной вероятности .....	33
<i>Глава четвертая</i>	
<b>Причины потери работоспособности технического объекта</b> .....	37
4.1. Источники и причины изменения начальных параметров технической системы .....	37
4.2. Процессы, снижающие работоспособность системы .....	40
4.3. Физика отказов .....	41
4.3.1. Анализ закономерностей изменения свойств материалов .....	41
4.3.2. Законы состояния .....	44
4.3.3. Законы старения .....	45
4.4. Отказы, вызываемые общими причинами (множественные отказы) .....	47
<i>Глава пятая</i>	
<b>Основные характеристики надежности элементов и систем</b> .....	49
5.1. Показатели надежности невозстанавливаемого элемента .....	49
5.2. Показатели надежности восстанавливаемого элемента .....	57
5.3. Показатели надежности системы, состоящей из независимых элементов .....	61

*Глава шестая*

<b>Расчет показателей надежности технических систем</b> . . . . .	64
6.1. Структурные модели надежности сложных систем . . . . .	66
6.2. Структурная схема надежности системы с последовательным соединением элементов . . . . .	69
6.3. Структурные схемы надежности систем с параллельным соединением элементов . . . . .	71
6.4. Структурные схемы надежности систем с основными видами соединения элементов . . . . .	72
6.5. Применение теории надежности для оценки безопасности технических систем . . . . .	77
6.6. Показатели безопасности систем «человек — машина» (СЧМ) . . . . .	83
6.7. Роль инженерной психологии в обеспечении надежности . . . . .	89

*Глава седьмая*

<b>Методы обеспечения надежности сложных систем</b> . . . . .	93
7.1. Конструктивные способы обеспечения надежности . . . . .	93
7.2. Технологические способы обеспечения надежности изделий в процессе изготовления . . . . .	95
7.3. Обеспечение надежности сложных технических систем в условиях эксплуатации . . . . .	97
7.4. Пути повышения надежности сложных технических систем при эксплуатации . . . . .	99
7.5. Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надежности техники при эксплуатации . . . . .	100

*Глава восьмая*

<b>Основы теории риска</b> . . . . .	104
8.1. Понятие риска и факторов его проявления . . . . .	104
8.2. Классификация видов риска . . . . .	111
8.3. Методология анализа и оценки риска . . . . .	121
8.4. Качественные методы анализа риска . . . . .	129
8.5. Количественная оценка риска . . . . .	136

*Глава девятая*

<b>Логико-графические методы анализа надежности и риска</b> . . . . .	146
9.1. Метод дерева отказов . . . . .	147
9.1.1. Определения и символы, используемые при построении дерева (графа) . . . . .	147
9.1.2. Процедура анализа дерева отказов (неисправностей) . . . . .	150
9.1.3. Построение дерева отказов . . . . .	152
9.1.4. Качественная и количественная оценка дерева отказов . . . . .	159
9.1.5. Аналитический вывод для простых схем дерева отказов . . . . .	165

9.1.6. Дерево с повторяющимися событиями .....	166
9.1.7. Вероятностная оценка дерева отказов .....	168
9.1.8. Преимущества и недостатки метода дерева отказов .....	173
9.2. Метод дерева событий .....	173
9.2.1. Построение дерева событий .....	174
9.2.2. Анализ дерева событий .....	175

### *Глава десятая*

<b>Применение теории риска для оценки уровня безопасности</b> ....	183
10.1. Критерии приемлемого риска .....	183
10.2. Управление риском .....	189
10.3. Применение теории риска в технических системах .....	193
10.4. Определение риска воздействия опасных факторов пожара .....	198
10.5. Оценка безопасности промышленного изделия на основе теории риска .....	207
10.6. Оценка риска аварий .....	213
10.7. Оценка последствий аварий .....	218
<b>Список литературы</b> .....	227



---

*Александр Григорьевич ВЕТОШКИН*  
**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ  
И БЕЗОПАСНОСТИ В ТЕХНОСФЕРЕ**

*Учебное пособие*

Издание второе, исправленное и дополненное



Зав. редакцией инженерно-технической  
литературы *Т. Ф. Гаврильева*  
Ответственный редактор *С. В. Макаров*  
Технический редактор *Е. С. Жукович*  
Корректор *Т. А. Кошелева*  
Подготовка иллюстраций *А. П. Маркова*  
Верстка *М. И. Хетерели*  
Выпускающие *Е. П. Королькова, Н. А. Крылова*

ЛР № 065466 от 21.10.97  
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10  
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

**Издательство «ЛАНЬ»**  
[lan@lanbook.ru](mailto:lan@lanbook.ru); [www.lanbook.com](http://www.lanbook.com)  
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 1, лит. А.  
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.  
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 15.02.16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108<sup>1/32</sup>.  
Печать офсетная. Усл. п. л. 12,60. Тираж 200 экз.

Заказ № 018-16.  
Отпечатано в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета  
в ПАО «Т8 Издательские Технологии»  
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.