

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Е. А. КИНДЕЕВ

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК

Учебное пособие



Владимир 2016

УДК 614.8:656.13
ББК 39.3
К41

Рецензенты:

Доктор технических наук
профессор кафедры мехатроники и электронных систем автомобилей
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
О. В. Веселов

Начальник Бюро мониторинга и анализа качества
ОАО «Владимирское КБ радиосвязи»
Т. В. Киндеева

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Киндеев, Е. А.

К41 Надежность технических систем и техногенный риск :
учеб. пособие / Е. А. Киндеев ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и
Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. – 154 с.
ISBN 978-5-9984-0703-1

Приведены основные положения теории надежности технических систем и техногенного риска, математические формулировки, используемые при оценке и расчете основных свойств и параметров надежности технических объектов, рассмотрены основы структурно-следственного анализа надежности технических систем, сформулированы основные методы повышения надежности технических систем.

Предназначено для студентов всех форм обучения направления 20.03.01 «Техносферная безопасность», изучающих дисциплину «Надежность технических систем и техногенный риск», а также может быть использовано при изучении дисциплин «Надежность технических систем» и «Управление рисками».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 50. Табл. 15. Библиогр.: 7 назв.

УДК 614.8:656.13
ББК 39.3

ISBN 978-5-9984-0703-1

© ВлГУ, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Недостаточная надежность технических систем приводит к большим затратам на ремонт, простоем оборудования, прекращению снабжения населения электроэнергией, водой, газом, транспортными средствами, невыполнению ответственных задач, иногда к авариям, связанным с большими экономическими потерями, разрушением крупных объектов и человеческими жертвами. Постоянное усложнение техники, ее функций, увеличение мощности, концентрация энергии в ограниченных объемах, рост требований к безопасности привели к необходимости разработки научных основ надежности технических систем.

Объекты исследования теории надежности – закономерности возникновения отказов технических систем и различные методики повышения безотказности их работы. Рассматриваются происходящие в объектах процессы, разрабатываются методы расчёта надёжности технических объектов, методы прогнозирования отказов. Выбираются способы увеличения надёжности при проектировании и эксплуатации объектов, а также способы сохранения надёжности при эксплуатации. Определяются методы сбора, учёта и анализа статистических данных, характеризующих надёжность.

Математическая основа теории надёжности – теория вероятностей и математическая статистика, математическая логика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, теория информации, теория планирования эксперимента и другие математические дисциплины.

В истории развития теории надежности выделяют три периода. С первой четверти до начала 60-х годов XX в. (период становления науки) надежность оценивалась по числу зафиксированных отказов. По статистике отказов входящих в систему элементов определялись значения интенсивности отказов, затем выполнялись расчёты надёжности. Такой подход развивался в связи с решением проблемы надежности в радиоэлектронике и автоматике. В числе авторов работ, по-

священных теории надежности, Н. Ф. Хоциалов (механические системы), А. М. Берг, Н. Г. Бруевич (радиоэлектроника и автоматика), Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев (математические вопросы теории надежности) и другие, а также известные зарубежные авторы – Г. Майер, Дж. Нейман, К. Шеннон, А. Пирс.

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

Во второй половине 70-х годов (третий период) усилия учёных были направлены на решение задач прогнозирования надёжности объектов и оценки надёжности сложных систем. Характерной особенностью периода стала глубина проникновения исследований в физико-химические и статистические закономерности появления отказов в простых и сложных системах.

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

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

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Надежность как комплексное свойство технических систем

Термины «надежность», «безопасность», «опасность» и «риск» часто смешивают, при этом их значения перекрываются, например, термины «анализ безопасности» или «анализ опасности» используются как равнозначные понятия.

Принятая в Российской Федерации терминология по ГОСТ 27.002-89 определяет *надежность* следующим образом: «Надежность – это 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. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств».

Недостаточная надежность технических систем приводит к повышенным затратам на их ремонт, чем меньше надежность технических систем, тем бóльшие партии их приходится изготавливать, что приводит к перерасходу металла, росту производственных мощностей, завышению расходов на ремонт и эксплуатацию.

Надежность объекта – *комплексное свойство*, 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.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта.

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 и предельное.

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

Неработоспособное изделие является одновременно неисправным.

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

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

1.2. Классификация и характеристики отказов

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

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

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

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).

При возникновении отказов в технической системе происходит следующее: изменяется характер работы, появляются внешние признаки отказов и зависимость от отказов других систем, уменьшается

возможность дальнейшего полноценного использования системы, появляется необходимость оценить возможность устранения отказов, характер устранения основных параметров отказов, определить причины возникновения отказов и др.

Содержание происходящих изменений:

1. Характер работы после возникновения отказов:

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

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

2. Внешние признаки отказов:

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

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

3. Зависимость от отказов других объектов:

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

– *зависимый отказ* обусловлен отказом другого объекта.

4. Возможность дальнейшего использования объектов:

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

– *частичный отказ* – выполнение некоторых функций.

5. Возможность устранения отказов:

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

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

6. Характер устранения отказов:

– *устойчивый отказ* – требующий проведения специальной работы;

– *самоустраняющийся отказ* – кратковременное нарушение работоспособности;

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

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

7. Характер изменения основных параметров отказов:

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

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

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

8. Причины возникновения отказов:

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

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

– *эксплуатационный отказ* – следствие нарушений правил эксплуатации.

9. Значимость отказов:

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

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

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

10. Время возникновения отказов:

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

– *отказ при нормальной эксплуатации*;

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

Вариант классификации отказов представлен на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Классификация отказов

1.3. Показатели надежности технических систем

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

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

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

Показатели безотказности:

- *вероятность безотказной работы $P(t)$* – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает;

- *вероятность отказа $Q(t)$* – вероятность того, что в пределах заданной наработки объекта произойдет отказ;

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

- *средняя наработка на отказ $T_{ср}$* – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки;

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

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что при определенных режимах и условиях эксплуатации в пределах заданной продолжительности работы изделия отказ не возникает.

$$P(t) = \int_{\tau}^{\infty} f(t) dt. \quad (1.1)$$

То есть вероятность безотказной работы есть вероятность того, что время T от момента начала работы до отказа будет больше или

равно времени τ , в течение которого $P(t)$ определяется и равна относительной площади под кривой $f(t)$ справа от значения τ (рис. 1.2).

Например, если $P(t)$ в течение $T = 1000$ ч считается равной 0,95,

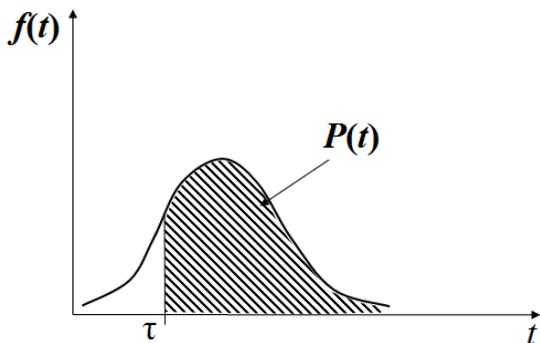


Рис. 1.2. Геометрическая интерпретация определения вероятности безотказной работы

то это означает, что из большого количества машин в среднем около 5 % потеряют свою работоспособность раньше, чем через 1000 ч работы.

Вероятность безотказной работы можно оценить статистически как отношение числа объектов, проработавших весь заданный период без отказа, к общему числу объектов, поставленных на испытание.

$$\bar{P}(t) = \frac{N-n(t)}{N}, \quad (1.2)$$

где N – общее число объектов, поставленных на испытание, $n(t)$ – число объектов, отказавших за время t .

При достаточно большом N $P(t) \approx \bar{P}(t)$.

Вероятность отказа $Q(t)$ есть вероятность того, что за время t произойдет хотя бы один отказ

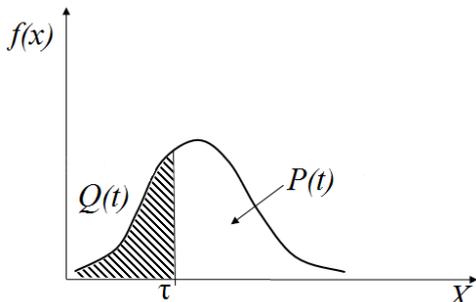


Рис. 1.3. Геометрическая интерпретация определения вероятности отказа

$$Q(t) = F(t). \quad (1.3)$$

Так, вероятность отказа и безотказной работы – события противоположные, охватывающие совокупность всех возможных исходов, справедливо

$$Q(t) + P(t) = 1 \text{ и } Q(t) = 1 - P(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (1.4)$$

Геометрически на графике плотности распределения вероятность отказа можно представить следующим образом (рис. 1.3).

Статистическая оценка вероятности отказа

$$\bar{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}. \quad (1.5)$$

Вероятность безотказной работы, при которой объект считается надежным, зависит от его назначения.

Так, для большинства механических систем обычно считается приемлемым уровень надежности, обеспечивающий вероятность безотказной работы около 0,95...0,96.

Для космических систем $Q(t)$ должна быть меньше $10^{-5} \dots 10^{-6}$.

Частота отказов $a(t)$ есть вероятность их появления в единицу времени и определяется плотностью распределения

$$a(t) = f(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.6)$$

По статистической информации $\bar{a}(t)$ определяется как отношение числа объектов $n(\Delta t)$, отказавших в единицу времени Δt , к числу объектов N в начале испытания:

$$\bar{a}(t) = f(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N\Delta t} = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t}. \quad (1.7)$$

Типичная кривая изменения частоты отказов объекта во времени приведена на рис. 1.4.

На кривой частоты отказов можно выделить три участка:

$0 - t_1$ – приработка;

$t_1 - t_2$ – нормальная эксплуатация (внезапные отказы);

$t_2 - t_3$ – предельное состояние.

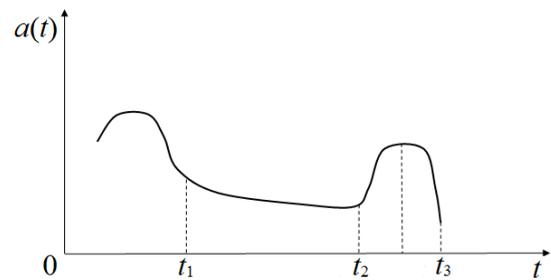


Рис. 1.4. Частота отказов

Уменьшение частоты $a(t)$ на втором участке обусловлено не повышением надежности, а уменьшением общего числа испытываемых объектов. Кроме того, в период предельного состояния кривая $a(t)$ имеет максимум, после чего частота отказов уменьшается, это объясняется опять же не повышением надежности в целом, а незначительным количеством исправно работающих к этому времени элементов.

Через частоту отказов выражают:

$$Q(t) = \int_0^t a(t) dt,$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt = \int_t^\infty a(t) dt. \quad (1.8)$$

Интенсивность отказа $\lambda(t)$ определяет вероятность отказа в единицу времени в момент t при условии, что событие не появилось до момента t .

Другими словами, интенсивность отказов определяет, сколько еще может проработать объект, если он до сих пор не отказал.

Условная вероятность появления отказа в единицу времени на интервале Δt

$$\frac{F_t(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t)\Delta t} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{(1 - F(t))\Delta t}. \quad (1.9)$$

Интенсивность отказов получается в результате перехода в этом уравнении к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F_t(\Delta t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t)\Delta t} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}$$

или $\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{(1 - F(t))\Delta t} = \frac{dF(t)}{dt} \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}$ (1.10)

По статистической информации интенсивность отказов $\bar{\lambda}(t)$ определяется как отношение числа объектов, отказавших в единицу времени, к числу объектов, работоспособных на данный момент времени

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{n(\Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (1.11)$$

здесь $N(t)$ – число работоспособных объектов в момент времени t

$$N(t) = N - n(t). \quad (1.12)$$

Кривая интенсивности отказов, как и кривая частоты отказов, имеет три характерных участка (рис. 1.5).

До времени t_1 – приработка, когда интенсивность отказов повышена из-за отказов, обусловленных дефектами;

период $t_1 - t_2$ – нормальная эксплуатация (внезапные отказы);

период со времени t_2 – вход в предельное состояние, когда начинаются отказы из-за старения элементов, их интенсивного износа и др.

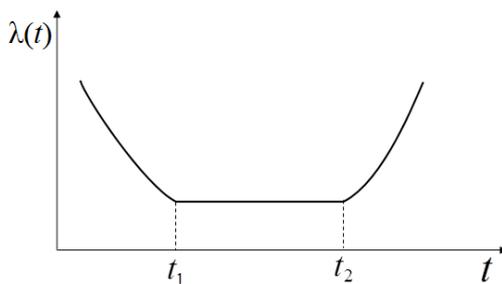


Рис. 1.5. График интенсивности отказов

Интенсивность отказов – удобный показатель безотказности объекта, так как упрощает многие расчеты.

Выразим вероятность безотказной работы через интенсивность отказов

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

$$\rightarrow \int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)} = \ln P(t) - \ln P(0) = \ln P(t), \quad (1.13)$$

откуда

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.14)$$

На участке, где $\lambda(t) = \text{const}$,

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.15)$$

Аналогично выражается и частота отказов

$$a(t) = -\frac{dP(t)}{dt} \frac{P(t)}{P(t)} = \lambda(t)P(t), \quad (1.16)$$

или $a(t) = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$ при $\lambda(t) = \text{const}$ $a(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ (1.17)

Среднее время безотказной работы – это математическое ожидание времени работы изделия до отказа.

$$T_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dP(t)}{dt} \right) dt =$$

$$= -\int_0^{\infty} t dP(t) = -tP(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Так как $P(\infty) = 0$, а $P(0) = 1$, то

$$T_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.18)$$

Геометрически среднее время безотказной работы выражается площадью фигуры, ограниченной осями координат $P(t)$ и кривой, что изображено на рис. 1.6.

Среднее время безотказной работы также выражается через интенсивность отказов

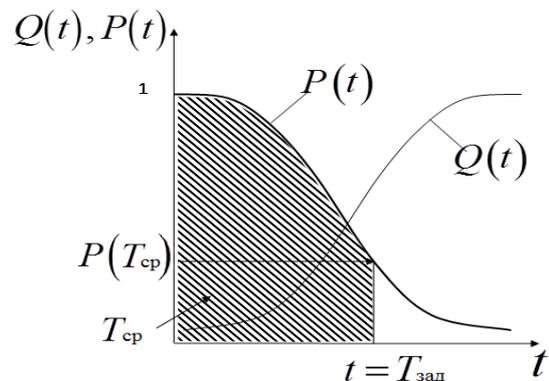


Рис. 1.6. Геометрическая интерпретация определения среднего времени безотказной работы

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} dt, \quad (1.19)$$

при $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ $T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$ (1.20)

Статистическая оценка $T_{\text{ср}}$ формируется следующим выражением:

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.21)$$

где t_i – время безотказной работы i -го объекта; N – число объектов, поступивших на испытание.

Пример. При испытании десяти систем получены следующие данные выхода их из строя:

i	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	7-я	8-я	9-я	10-я
$t, \text{ч}$	80	120	90	140	70	95	75	130	85	115

Определите среднее время безотказной работы.

Решение.

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{10} (80 + 120 + 90 + 140 + 70 + 95 + 75 + 130 + 85 + 115) = 100 \text{ ч.}$$

Ввиду того что время испытаний бывает весьма продолжительным, а также при значительном количестве испытываемых объектов, пользуются упрощенной зависимостью. Для чего временной интервал t_k , в течение которого из строя вышли все испытываемые объекты, разбивают на части $\Delta t = t_j - t_{j-1}$, в количестве $m = t_k/\Delta t$, здесь t_j, t_{j-1} – время конца и начала j -го интервала. Характеристикой интервала выступает среднее значение $t_{\text{ср}j} = (t_{j-1} + t_j)/2$.

Имея данные о количестве вышедших из строя объектов Δn_j в каждом из j -х интервалов времени, рассчитывают

$$\bar{T}_{\text{ср}} \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m \Delta n_j t_{\text{ср}j}. \quad (1.22)$$

Основным достоинством данного показателя надежности является его простота вычисления на основе экспериментальных статистических данных.

Но надо понимать, что $T_{\text{ср}}$ как математическое ожидание случайной величины не может полностью охарактеризовать время безотказной работы объекта, необходимо знать, по крайней мере, дисперсию времени отказа.

Знание же одной из функций $P(t), Q(t), a(t), \lambda(t)$ позволяет определить другие показатели надежности.

Соотношения между ними приведены в таблице.

Соотношения между показателями безотказности
невосстанавливаемых объектов

Показатель	$P(t)$	$Q(t)[\equiv F(t)]$	$a(t)[\equiv f(t)]$	$\lambda(t)$
$P(t)$	$P(t)$	$1 - Q(t)$	$\int_t^{\infty} a(t) dt$	$e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
$Q(t)$	$1 - P(t)$	$Q(t)$	$\int_0^t a(t) dt$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
$a(t)$	$-\frac{dP(t)}{dt}$	$\frac{dQ(t)}{dt}$	$a(t)$	$\lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
$\lambda(t)$	$-\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt};$ $\frac{f(t)}{P(t)}$	$\frac{dQ(t)}{dt} \frac{1}{1 - Q(t)}$	$\frac{a(t)}{e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}};$ $\frac{a(t)}{P(t)}$	$\lambda(t)$
T_{cp}	$\int_0^{\infty} P(t) dt$	$\int_0^{\infty} (1 - Q(t)) dt$	$\int_0^{\infty} t \cdot a(t) dt$	$\int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$

Показатели долговечности

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

Переход в предельное состояние определяется моментом, когда дальнейшая эксплуатация объекта не целесообразна из-за невозможности поддержания безопасности, безотказности или эффективности эксплуатации на допустимом уровне или когда в результате изнашивания и старения объект пришел в такое состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает восстановления требуемой работоспособности.

Признаки предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией на данный объект.

Для оценки долговечности объекта применяют показатели, характеризующие выход за допустимые пределы основных технических характеристик (мощность, скорость, точность, КПД и др.) или способность выполнять свои функции с допустимыми затратами на обслуживание и ремонт. К числу таких показателей относят срок службы и ресурс.

Количественные показатели долговечности восстанавливаемых изделий делятся на две группы.

1. Показатели, связанные со сроком службы изделия:

- *срок службы $T_{сл}$* – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновление после ремонта до перехода в предельное состояние;

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

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

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

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

- *гамма-процентный срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

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

2. Показатели, связанные с ресурсом изделия:

- ресурс T_p – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновление после ремонта до перехода в предельное состояние;

- *средний ресурс* $T_{p.ср}$ – математическое ожидание ресурса, для технических систем в качестве критерия долговечности используют технический ресурс;

- *назначенный ресурс* $T_{p.н}$ – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния;

- *гамма-процентный ресурс* – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный ресурс показывает, что γ процентов изделий данной модификации должны иметь наработку до предельного состояния не ниже величины $T_{p.\gamma}$:

$$P(T_{p.\gamma}) = \frac{\gamma\%}{100} = P(T_p > T_{p.\gamma}) = \int_{T_{p.\gamma}}^{\infty} f_p(t) dt. \quad (1.23)$$

Гамма-процентное значение ресурса можно определить по интегральной $F_p(t)$ и дифференциальной $f_p(t)$ функциям (рис. 1.7).

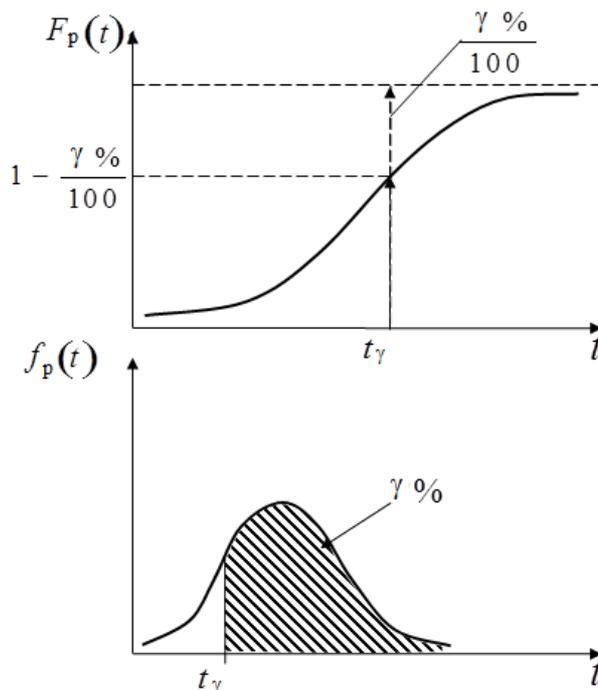


Рис. 1.7. Определение гамма-процентного ресурса

Основное отличие $T_{сл}$ от T_p в том, что $T_{сл}$ характеризует продолжительность существования объекта независимо от характера его использования, а T_p – фактическую наработку объекта.

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

Показатели сохраняемости

При хранении и транспортировке объекта причины, обуславливающие возникновение отказов, связаны обычно с воздействием окружающей среды и времени. Это может приводить к отказам вследствие коррозии металлических деталей и старения резиновых, окисления, высыхания, расслоения и т. д. Подобные воздействия требуют регламентных работ и проверок, восстановительных работ по устранению отказов.

Показателями сохраняемости служат следующие параметры.

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

Поскольку срок сохраняемости – случайная величина, ее можно характеризовать плотностью распределения $f_c(t)$ или интегральной функцией появления отказов $F_c(t)$, или функцией сохранения работоспособности $P_c(t)$ при хранении. При этом *средний срок сохраняемости* $T_{с.с}$ за промежуток времени t_1 до t_2 будет

$$T_{с.с} = \int_{t_1}^{t_2} t f_c(t) dt. \quad (1.24)$$

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

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

Экономические показатели надежности

Экономические показатели при оценке надежности весьма важны, так как повышение безотказности и долговечности машин, с одной стороны, связано с дополнительными материальными затратами, а с другой – с уменьшением затрат общественного труда на ремонт и обслуживание техники с устранением потерь от простоя машин в ремонте.

Показателем надежности $K_э$ (*коэффициент экономичности*) с экономической точки зрения может служить сумма затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией машины, отнесенная к длительности ее эксплуатации:

$$K_э = \frac{Q_и + Q_э}{T_э}, \text{ руб./ч}, \quad (1.25)$$

где $Q_и$ – стоимость изготовления новой машины, руб; $Q_э$ – суммарные затраты на эксплуатацию, ремонт и обслуживание машины; $T_э$ – период эксплуатации, ч.

Следует стремиться к минимизации $K_э$.

Коэффициент эксплуатационных издержек $K_{из}$ показывает соотношение между стоимостью изготовления и эксплуатацией

$$K_{из} = \frac{Q_и}{Q_и + Q_э}. \quad (1.26)$$

Более высокая надежность достигается за счет дополнительных затрат. В связи с этим часто используют показатель *цены надежности* Q_n . Для прогнозирования затрат на повышение надежности в

ряде случаев применяют метод сравнения с прототипом на основании общих эмпирических зависимостей типа

$$Q_n = Q_{н.а} \left(\frac{T_0}{T} \right)^a, \quad (1.27)$$

где $Q_{н.а}$ – цена надежности аналога или прототипа; T_0, T – наработка на отказ прототипа и проектируемого изделия; a – эмпирический показатель, характеризующий уровень прогрессивности производства с точки зрения возможностей заданного повышения надежности изделия, $a = 0,5 \dots 1,5$.

Комплексные показатели надежности

Единичные показатели безотказности, такие как параметр потока отказов и наработка на отказ восстанавливаемых объектов, не учитывают время, затрачиваемое на восстановление. Поэтому данные показатели не дают возможности оценить готовность к выполнению заданных функций в нужное время.

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:

$$K_{ти} = \frac{T_{сум. раб}}{T_{раб} + T_{рем} + T_{обсл}}. \quad (1.28)$$

Коэффициент технического использования, взятый за период между плановыми ремонтами и техническим обслуживанием, называется коэффициентом готовности, который оценивает непредусмотренные остановки машины и то, 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 объек-

та 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.

Физический смысл коэффициента – среднее относительное время пребывания объекта в работоспособном состоянии:

$$K_{\Gamma} = \frac{\mu}{\omega + \mu} = \frac{1}{T_{\text{в.ср}} \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_{\text{в.ср}}} \right)} = \frac{T_0 T_{\text{в.ср}}}{T_{\text{в.ср}} (T_{\text{в.ср}} + T_0)} = \frac{T_0}{T_0 + T_{\text{в.ср}}}, \quad (1.29)$$

где T_0 – наработка на отказ; $T_{\text{в.ср}}$ – среднее время восстановления; ω – параметр потока отказов; μ – интенсивность восстановления работоспособности.

Часто коэффициент готовности определяется через средний ресурс $T_{\text{р.ср}}$ – среднюю суммарную наработку машины до первого капитального ремонта в часах:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{р.ср}}}{T_{\text{р.ср}} + T'_{\text{в.ср}}}, \quad (1.30)$$

здесь $T'_{\text{в.ср}}$ – суммарное время восстановления работоспособности машины после отказов (до капитального ремонта).

Соответственно повышение K_{Γ} достигается либо увеличением среднего времени безотказной работы, либо уменьшением среднего времени восстановления.

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.

Для выполнения этого требования необходимо, чтобы в момент возникновения потребности в использовании объект был работоспособен, т. е.

$$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma} P(t_{\text{р}}) = \frac{1}{1 + \frac{\omega}{\mu}} e^{-\mu t_{\text{р}}}. \quad (1.31)$$

Коэффициент простоя K_{Π} – вероятность неработоспособного состояния восстанавливаемого объекта с конечным временем восстановления

$$K_{\Pi} = \frac{\omega}{\omega + \mu} = \frac{T_{в.ср}}{T_{в.ср} + T_0}. \quad (1.32)$$

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.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «надежность» применительно к техническим системам.
2. Какими основными событиями и состояниями характеризуется надежность технических систем?
3. Чем отличаются исправное и работоспособное состояния технической системы?
4. В каких случаях наступает предельное состояние объекта?
5. Какими могут быть отказы по причинам и характеру возникновения?
6. По каким признакам классифицируют отказы?
7. Что такое показатели надежности?
8. Перечислите и поясните показатели безотказности.
9. Перечислите и поясните показатели долговечности.

Глава 2. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

2.1. Случайные события

2.1.1. Алгебра событий

Под *испытанием* или *опытом* понимается выполнение определенного комплекса условий, в которых наблюдается то или иное явление, фиксируется тот или иной результат.

Случайное событие (или просто *событие*) – всякий факт (исход наблюдения), который может произойти или не произойти в результате испытания.

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

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

Случайные события обозначаются латинскими буквами A, B, C, \dots, U, V , причем U – достоверное, а V – невозможное события.

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

Выборка с возвращением – при последовательном выборе объектов из множества после каждого выбора взятый объект возвращается в исходное множество.

Выборка без возвращения – из множества выбирается некоторое количество объектов без возвращения.

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

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

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

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

Равенство $A = B$ означает, что появление одного из этих событий влечет за собой появление другого. Произведение событий A и B есть событие $C = AB$, состоящее в наступлении обоих событий A и B . Сумма событий A и B есть событие $C = A + B$, состоящее в наступлении хотя бы одного из событий A и B . Разность событий A и B есть событие $C = A - B$, состоящее в том, что A происходит, а B не происходит. Противоположное событие обозначается той же буквой, но с чертой сверху. Например, A и \bar{A} – противоположные события, причем \bar{A} означает, что A не происходит. События A и B несовместны, если $AB = \emptyset$. События A_k ($k = 1, 2, \dots, n$) образуют полную группу событий, если в результате опыта обязательно должно произойти хотя бы одно из них.

Случайной называется величина, которая может принять какое-либо неизвестное заранее возможное значение, зависящее от случайных факторов, не поддающихся учету.

Пример 1. При каких событиях A и B возможно равенство $A + B = A$?

Решение. Сумма $A + B$ представляет собой событие, состоящее в наступлении хотя бы одного из событий A или B . Если $A + B = A$, то событие A включает в себя событие B .

Пример 2. При каких событиях A и B возможно равенство $AB = A$?

Решение. Произведение AB представляет собой событие, состоящее в наступлении обоих событий A и B . Если $AB = A$, то событие A представляет собой частный случай события B .

Пример 3. Из таблицы случайных чисел наугад выбраны два числа. События A и B соответственно означают, что выбрано хотя бы одно простое и хотя бы одно четное число. Что означают события AB и $A + B$?

Решение. Событие AB означает наступление событий A и B , т. е. из двух выбранных чисел одно простое, а другое четное. Событие $A + B$ означает наступление хотя бы одного из событий A или B , т. е. среди двух выбранных чисел имеется хотя бы одно простое или хотя бы одно четное число, или одно из этих чисел простое, другое четное.

2.1.2. Классическое определение вероятности

Для количественного сравнения событий по степени вероятности их появления вводится определенная мера, которую называют вероятностью события и обозначают $P(A)$. Вероятность – одно из основных понятий теории вероятностей. Существует несколько определений этого понятия. Приведем определение, которое называют классическим.

Вероятность события A есть отношение числа исходов, благоприятствующих появлению этого события, к общему числу всех равновозможных несовместных элементарных исходов, образующих полную группу. Итак, вероятность события A определяется формулой

$$P(A) = m/n, \quad (2.2)$$

где m – число элементарных исходов, при которых происходит событие A ; n – число всех возможных элементарных исходов испытания.

Здесь предполагается, что элементарные исходы несовместны, равновозможны и образуют полную группу. Под равновозможными понимаются события, которые в силу тех или других причин не имеют объективного преимущества одно перед другим. Из определения вероятности вытекают следующие её свойства:

Свойство 1. Вероятность достоверного события равна единице.

Действительно, если событие достоверно, то каждый исход испытания благоприятствует событию. В этом случае $m = n$, следовательно, $P(A) = m/n = n/n = 1$.

Свойство 2. Вероятность невозможного события равна нулю.

Действительно, если событие невозможно, то ни один из элементарных исходов испытания не благоприятствует событию. В этом случае $m = 0$, следовательно, $P(A) = m/n = 0/n = 0$.

Свойство 3. Вероятность случайного события есть положительное число, заключенное между нулем и единицей.

Действительно, случайному событию благоприятствует лишь часть из общего числа элементарных исходов испытания. В этом случае $0 \leq m \leq n$, значит $0 \leq m/n \leq 1$, следовательно, $0 \leq P(A) \leq 1$.

Свойство 4. Вероятность противоположного события дополняет вероятность данного события до единицы.

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1, \quad (2.3)$$

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

Свойство 5. Сумма вероятностей несовместных событий, составляющих полную группу событий, равна единице:

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = 1, \quad (2.4)$$

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

Пример. Куб, все грани которого окрашены, распилен на тысячу кубиков одинакового размера. Полученные кубики тщательно перемешаны. Определить вероятность того, что кубик, извлеченный наудачу, будет иметь две окрашенные стороны.

Решение. Всего получается кубиков $n = 1000$ штук. Куб имеет 12 ребер, на каждом из которых по 8 кубиков с двумя окрашенными сторонами. Поэтому $m = 12 \cdot 8 = 96$ штук. Вероятность того, что наугад извлеченный кубик будет иметь две окрашенные стороны $p = 0,096$.

2.1.3. Основные формулы комбинаторики

Комбинаторика изучает количества комбинаций, которые можно составить из элементов заданного конечного множества, подчиненных определенным условиям. При непосредственном вычислении вероятностей часто используют формулы комбинаторики. Приведем наиболее часто употребляемые из них.

Перестановками называют комбинации, состоящие из одних и тех же n различных элементов и отличающиеся только порядком их расположения. Число всех возможных перестановок

$$P_n = n!, \quad (2.5)$$

где $n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \dots n$.

Заметим, что по определению $0! = 1$.

Пример 1. Сколько трехзначных чисел можно составить из цифр 1, 2 и 3, если каждая цифра входит в изображение числа только один раз?

Решение. Искомое число трехзначных чисел

$$P_3 = 3! = 1 \cdot 2 \cdot 3 = 6.$$

Размещениями называют комбинации, составленные из n различных элементов по m элементов, которые отличаются либо составом элементов, либо их порядком. Число всех возможных размещений

$$A_n^m = n(n-1)(n-2)\dots(n-m+1), \quad \text{или} \quad A_n^m = \frac{n!}{(n-m)!}. \quad (2.6)$$

Пример 2. Сколько можно составить сигналов из 6 символов различного цвета, взятых по 2?

Решение. Искомое число сигналов

$$A_6^2 = \frac{6!}{(6-2)!} = \frac{6!}{4!} = 5 \cdot 6 = 30.$$

Сочетаниями называют комбинации, составленные из n различных элементов по m элементов, которые отличаются хотя бы одним элементом. Число сочетаний

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}. \quad (2.7)$$

Пример 3. Студент знает 20 вопросов из 25. Найти вероятность того, что он ответит на 3 вопроса, заданных преподавателем.

Решение. Количество способов выбрать 3 вопроса из 25 имеющихся $n = C_{25}^3 = \frac{25!}{3! \cdot 22!}$, а количество комбинаций выбрать 3 вопроса

из 20 известных студенту $m = C_{20}^3 = \frac{20!}{3! \cdot 17!}$. Вероятность того, что

студент ответит на все три заданных ему вопроса, равна $P = \frac{m}{n} = 0,49$.

Подчеркнем, что количество размещений, перестановок и сочетаний связаны равенством

$$A_n^m = P_m C_n^m. \quad (2.8)$$

Замечание. Выше предполагалось, что все n элементов различны. Если же некоторые элементы повторяются, то в этом случае *комбинации с повторениями* вычисляют по другим формулам. Например, если среди n элементов есть n_1 элементов одного вида, n_2 элементов другого вида и так далее, то число перестановок с повторениями

$$P_n(n_1, n_2, \dots) = n! / (n_1! n_2! \dots), \quad (2.9)$$

где $n_1 + n_2 + \dots = n$.

При решении задач комбинаторики используют следующие правила:

Правило суммы. Если некоторый объект A может быть выбран из совокупности объектов m способами, а другой объект B может быть выбран n способами, то выбрать либо A , либо B можно $m + n$ способами.

Правило произведения. Если объект A можно выбрать из совокупности объектов m способами и после каждого такого выбора объект B можно выбрать n способами, то пара объектов (A, B) в указанном порядке может быть выбрана mn способами.

2.1.4. Непосредственный подсчет вероятностей

Если результат опыта можно представить в виде полной группы событий, которые попарно несовместны и равновозможны, то *вероятность события* равна отношению числа m благоприятствующих этому событию исходов опыта к общему числу n всех возможных исходов, т. е. $p = m/n$. Под равновозможными понимаются события, которые в силу тех или других причин не имеют объективного преимущества одно перед другим.

Пример 1. Набирая номер телефона, абонент забыл одну цифру и набрал её наугад. Найти вероятность того, что набрана нужная цифра.

Решение. Обозначим через A событие – набрана нужная цифра. Абонент мог набрать любую из 10 цифр, поэтому общее число возможных элементарных исходов равно 10. Эти исходы несовместны, равновозможны и образуют полную группу. Благоприятствует событию A лишь один исход (нужная цифра лишь одна). Искомая вероятность равна отношению числа исходов, благоприятствующих событию, к числу всех элементарных исходов $P(A) = 1/10$.

Пример 2. Набирая номер телефона, абонент забыл последние две цифры и, помня лишь, что эти цифры различны, набрал их наудачу. Найти вероятность того, что набраны нужные цифры.

Решение. Обозначим через B событие – набраны две нужные цифры. Всего можно набрать столько различных цифр, сколько может быть составлено размещений из десяти цифр по две, т. е. $A_{10}^2 = 10 \cdot 9 = 90$. Таким образом, общее число возможных элементарных исходов равно 90. Эти исходы несовместны, равновозможны и образуют полную группу. Благоприятствует событию B лишь один исход. Искомая вероятность равна отношению числа исходов, благоприятствующих событию, к числу всех элементарных исходов $P(B) = 1/90$.

Пример 3. В партии из 10 деталей 7 стандартных. Найти вероятность того, что среди шести взятых наудачу деталей 4 стандартных.

Решение. Общее число возможных элементарных исходов испытания равно числу способов, которыми можно извлечь 6 деталей из 10, т. е. числу сочетаний из 10 элементов по 6 элементов (C_{10}^6).

Определим число исходов, благоприятствующих интересующему нас событию A (среди шести взятых деталей 4 стандартных). Четыре стандартные детали можно взять из семи стандартных деталей C_7^4 способами; при этом остальные две ($6 - 4 = 2$) детали должны быть нестандартными; взять же две нестандартные детали из трех ($10 - 7 = 3$) нестандартных деталей можно C_3^2 способами. Следовательно, число благоприятствующих исходов равно $C_7^4 C_3^2$.

Искомая вероятность равна отношению числа исходов, благоприятствующих событию, к числу всех элементарных исходов

$$P(A) = (C_7^4 C_3^2) / C_{10}^6 = 1/2.$$

2.1.5. Условная вероятность. Теорема умножения вероятностей

Условной вероятностью $P_A(B)$ называют вероятность события B , определенную при условии, что событие A уже произошло.

Теорема умножения вероятностей: вероятность совместного появления двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, определенную при условии, что первое событие уже наступило

$$P(AB) = P(A) P_A(B). \quad (2.10)$$

Следствие. Вероятность совместного появления нескольких событий равна произведению вероятности одного из них на условные вероятности всех остальных, причем вероятность каждого последующего события вычисляется в предположении, что все предыдущие события уже появились

$$P(A_1 A_2 A_3 \dots A_n) = P(A_1) P_{A_1}(A_2) P_{A_1 A_2}(A_3) \dots P_{A_1 A_2 \dots A_{n-1}}(A_n), \quad (2.11)$$

где $P_{A_1 A_2 \dots A_{n-1}}(A_n)$ – вероятность события A_n , вычисленная в предположении, что события A_1, A_2, \dots, A_{n-1} наступили. В частности, для трех событий

$$P(ABC) = P(A) P_A(B) P_{AB}(C). \quad (2.12)$$

Заметим, что порядок, в котором расположены события, может быть выбран любым, т. е. безразлично, какое событие считать первым, вторым и т. д.

Пример 1. Определить вероятность того, что выбранное наугад изделие является первосортным, если известно, что 3 % всей продукции являются браком, а 35 % небракованных изделий удовлетворяют требованиям первого сорта.

Решение. Пусть событие A состоит в том, что выбранное изделие небракованное, а событие B – выбранное изделие первосортное.

Вероятность события A составляет: $P(A) = 1 - 0,03 = 0,97$; условная вероятность события B составляет $P(B/A) = 0,35$.

Искомая вероятность $p = P(AB) = 0,97 \cdot 0,35 = 0,34$.

Пример 2. Партия из ста изделий подвергается выборочному контролю. Условие непригодности всей партии – наличие хотя бы одного неисправного изделия среди десяти проверяемых. Какова вероятность для данной партии быть непринятой, если она содержит 2 % неисправных изделий?

Решение. Найдем вероятность q противоположного события A , которое заключается в том, что партия изделий будет принята. Данное событие представляет собой произведение десяти событий

$$A = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 A_8 A_9 A_{10},$$

где A_k ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$) означает, что k -е проверенное изделие исправно.

Вероятность события A_1 $P(A_1) = 98/100$, так как всего изделий 100, а исправных из них 98. После осуществления события A_1 деталей останется 99, среди которых исправных 97, поэтому $P(A_2/A_1) = 97/99$. Аналогично $P(A_3/A_1A_2) = 96/98$ и так далее для остальных событий. Находим вероятность события A :

$$q = \frac{98}{100} \frac{97}{99} \frac{96}{98} \frac{95}{97} \frac{94}{96} \frac{93}{95} \frac{92}{94} \frac{91}{93} \frac{90}{92} \frac{89}{91} = 0,846.$$

Вероятность для данной партии быть непринятой $p = 1 - q = 0,154$.

2.1.6. Теорема сложения вероятностей

Вероятность появления одного из двух *несовместных* событий, безразлично какого, равна сумме вероятностей этих событий.

$$P(A + B) = P(A) + P(B). \quad (2.13)$$

Следствие: сумма вероятностей двух противоположных событий равна единице.

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1. \quad (2.14)$$

Вероятность появления хотя бы одного из двух *совместных* событий равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного появления.

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (2.15)$$

Пример 1. Стрелок стреляет по мишени, разделенной на три области. Вероятность попадания в первую область равна 0,3, во вторую – равна 0,25. Найти вероятность того, что стрелок при одном выстреле попадет либо в первую, либо во вторую область.

Решение. Событие A – «стрелок попал в первую область» и событие B – «стрелок попал во вторую область» – несовместны (попадание в одну область исключает попадание в другую), поэтому применима теорема сложения несовместных событий.

Искомая вероятность $P(A + B) = P(A) + P(B) = 0,3 + 0,25 = 0,55$.

Пример 2. Вероятности попадания в цель при стрельбе первого и второго стрелка соответственно равны: $p_1 = 0,3$; $p_2 = 0,4$. Найти вероятность попадания при одновременном выстреле обоих стрелков в одну цель одним из стрелков.

Решение. Вероятность попадания в цель каждым стрелком не зависит от результата стрельбы другого стрелка, поэтому события A (попадание первого стрелка) и B (попадание второго стрелка) независимы.

Вероятность события AB (оба стрелка попали в цель)

$$P(AB) = P(A) P(B) = 0,3 \cdot 0,4 = 0,12.$$

Искомая вероятность

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB) = 0,3 + 0,4 - 0,12 = 0,58.$$

2.1.7. Формула полной вероятности

Сумма вероятностей событий A_1, A_2, \dots, A_n , образующих *полную группу* несовместных событий, равна единице:

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = 1. \quad (2.16)$$

Пример. Для контроля продукции из трех партий изделий взято для испытания одно изделие. Как велика вероятность обнаружения неисправного изделия, если в первой партии $2/3$ изделий неисправны, а в двух других – все изделия исправные?

Решение. Вероятность извлечь изделие из первой партии $P(A_1)$ составляет $1/3$, так как партий всего три и они равновероятны. Вероятность извлечь изделие из второй партии $P(A_2)$ составляет $1/3$ и из третьей партии $P(A_3)$ также составляет $1/3$. При этом вероятность обнаружить неисправное изделие в первой партии равна $P(B_1) = 2/3$, а во второй и в третьей эта вероятность равна нулю. Таким образом, вероятность извлечь неисправное изделие составит

$$P = P(A_1) P(B_1) + P(A_2) P(B_2) + P(A_3) P(B_3) = 1/3 \cdot 2/3 + 1/3 \cdot 0 + 1/3 \cdot 0 = 2/9.$$

2.1.8. Вычисление вероятностей гипотез после испытания (формула Байеса)

Пусть событие A может наступить при условии появления одного из несовместных событий B_1, B_2, \dots, B_n , образующих полную группу. Поскольку заранее не известно, какое из этих событий наступит, их называют *гипотезами*. Вероятность появления события A определяется по формуле полной вероятности

$$P(A) = P(B_1) P_{B_1}(A) + P(B_2) P_{B_2}(A) + \dots + P(B_n) P_{B_n}(A). \quad (2.17)$$

Первоначальные (до проведения опыта) вероятности гипотез $P(B_1), P(B_2), \dots, P(B_n)$ называются *априорными*, а вероятности гипотез после проведения опыта – $P_{B_1}(A), P_{B_2}(A), \dots, P_{B_n}(A)$ – *апостериорными*.

Пример. Детали, производимые механическим цехом завода, попадают для проверки к одному из двух контролеров. К первому контролеру деталь может попасть с вероятностью $0,56$, а ко второму – с вероятностью $0,44$.

Вероятность того, что годная деталь будет признана годной первым контролером, равна $0,92$. Вероятность того, что годная деталь будет признана годной вторым контролером, равна $0,98$. Годная деталь при проверке была признана годной. Найти вероятность того, что эту деталь проверил первый контролер.

Решение. Обозначим через A событие, состоящее в том, что годная деталь признана стандартной. Можно сделать два предположения:

- 1) деталь проверил первый контролер (гипотеза B_1);
- 2) деталь проверил второй контролер (гипотеза B_2).

Искомую вероятность того, что деталь проверил первый контролер, найдем по формуле Байеса:

$$P_A(B_1) = \frac{P(B_1)P_{B_1}(A)}{P(B_1)P_{B_1}(A) + P(B_2)P_{B_2}(A)}.$$

По условию задачи имеем:

$P(B_1) = 0,56$ (вероятность того, что деталь попадает к первому контролеру);

$P(B_2) = 0,44$ (вероятность того, что деталь попадет ко второму контролеру);

$P_{B_1}(A) = 0,92$ (вероятность того, что годная деталь будет признана первым контролером годной);

$P_{B_2}(A) = 0,98$ (вероятность того, что годная деталь будет признана вторым контролером годной).

Искомая вероятность

$$P_A(B_1) = (0,56 \cdot 0,92) / (0,56 \cdot 0,92 + 0,44 \cdot 0,98) \approx 0,54.$$

Как видно, до испытания вероятность гипотезы B_1 равнялась 0,6, после того, как стал известен результат испытания, вероятность этой гипотезы (точнее, условная вероятность) изменилась и стала равной 0,54. Таким образом, использование формулы Байеса позволило оценить вероятность рассматриваемой гипотезы.

2.1.9. Повторные независимые испытания (формула Бернулли)

Если производится несколько испытаний, причем вероятность события A в каждом испытании не зависит от исходов других испытаний, то такие испытания называют *независимыми относительно события A* .

В разных независимых испытаниях событие A может иметь либо различные вероятности, либо одну и ту же вероятность. Будем далее рассматривать лишь такие независимые испытания, в которых событие A имеет одну и ту же вероятность.

Ниже воспользуемся понятием *сложного события*, понимая под ним совмещение нескольких отдельных событий, которые называют *простыми*.

Пусть производится n независимых испытаний, в каждом из которых событие A может появиться либо не появиться. Условимся считать, что вероятность события A в каждом испытании одна и та же, а именно равна p . Следовательно, вероятность ненаступления события A в каждом испытании также постоянна и равна $q = 1 - p$.

Вычислим вероятность того, что при n испытаниях событие A осуществится ровно k раз и, следовательно, не осуществится $n - k$ раз. Важно подчеркнуть, что не требуется, чтобы событие A повторилось ровно k раз в определенной последовательности. Искомую вероятность обозначим $P_n(k)$. Например, символ $P_5(3)$ означает вероятность того, что в пяти испытаниях событие появится ровно три раза и, следовательно, не наступит два раза.

Поставленную задачу можно решить с помощью так называемой формулы Бернулли.

Вывод формулы Бернулли. Вероятность одного сложного события, состоящего в том, что в n испытаниях событие A наступит k раз и не наступит $n - k$ раз, по теореме умножения вероятностей независимых событий равна $p^k q^{n-k}$. Таких сложных событий может быть столько, сколько можно составить сочетаний из n элементов по k элементов, т. е. C_n^k . Так как эти сложные события несовместны, то по теореме сложения вероятностей несовместных событий искомая вероятность равна сумме вероятностей всех возможных сложных событий. Поскольку же вероятности всех этих сложных событий одинаковые, то искомая вероятность (появления k раз события A в n испытаниях) равна вероятности одного сложного события, умноженной на их число:

$$P_n(k) = C_n^k p^k q^{n-k}, \quad (2.18)$$

или

$$P_n(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{n-k}. \quad (2.19)$$

Полученную формулу называют *формулой Бернулли*.

Пример. Вероятности того, что при текущем ремонте автомобиля потребуются замена воздушного фильтра, составляет $P = 0,2$. Определить вероятность того, что при пяти текущих ремонтах потребуются:

- а) три воздушных фильтра;
- б) хотя бы один воздушный фильтр;
- в) не менее двух воздушных фильтров.

Решение.

а) вероятность того, что при пяти текущих ремонтах ($n = 5$) потребуются три воздушных фильтра ($k = 3$), составит

$$P_5(3) = C_5^3 p^3 q^{5-3} = C_5^3 p^3 q^2 = 10 \cdot 0,2^3 \cdot 0,8^2 = 0,0512,$$

б) вероятность того, что при пяти текущих ремонтах ($n = 5$) потребуется хотя бы один воздушный фильтр ($k \geq 1$), составит

$$P_5(k \geq 1) = 1 - P_5(0) = 1 - C_5^0 p^0 q^5 = 0,67232,$$

в) вероятность того, что при пяти текущих ремонтах ($n = 5$) потребуется не менее двух воздушных фильтров ($k \geq 2$), составит

$$P_5(k \geq 2) = 1 - P_5(0) - P_5(1) = 1 - C_5^0 p^0 q^5 - C_5^1 p^1 q^4 = 0,26272.$$

2.1.10. Формула Пуассона

Если n велико, то формула Бернулли дает погрешности и неудобна для выполнения расчета. В таких случаях можно воспользоваться формулой Пуассона:

$$P_n(k) = \frac{\mu^k}{k!} e^{-\mu} \quad (2.20)$$

где n – количество испытаний; k – количество появлений нужного события A ;

$$\mu = np, \quad (2.21)$$

где p – вероятность появления события A в одном испытании.

Пример. Ремонтное подразделение получает со склада 100 деталей. Известно, что 1 % деталей имеют скрытый дефект. Найти вероятность того, что в партии две дефектные детали.

Решение. Так как в партии 100 деталей, применим формулу Пуассона. При этом $n = 100$, $p = 0,01$, $\mu = np = 100 \cdot 0,01 = 1$. Определим $P_{100}(2)$.

$$P_{100}(2) = \frac{1^2}{2!} e^{-1} = 0,184.$$

2.2. Случайные величины

2.2.1. Виды случайных величин

Случайной называют величину, которая в результате испытания примет одно и только одно возможное значение, заранее не известное и зависящее от случайных воздействий, которые не могут быть учтены до проведения испытания.

Пример 1. Количество лампочек, которое выйдет из строя за год эксплуатации из десяти есть случайная величина, которая имеет следующие возможные значения: 0, 1, 2, ..., 10.

Пример 2. Расстояние, которое пролетит пуля при выстреле из винтовки, есть случайная величина. Действительно, расстояние зависит не только от установки прицела, но и от многих других причин (силы и направления ветра, температуры, плотности воздуха и т. д.), которые не могут быть полностью учтены. Возможные значения этой величины принадлежат некоторому промежутку (a, b) .

Будем далее обозначать случайные величины прописными буквами X, Y, Z , а их возможные значения – соответствующими строчными буквами x, y, z . Например, если случайная величина X имеет три возможных значения, то они будут обозначены: x_1, x_2, x_3 .

Вернемся к примерам, приведенным выше. В первом из них случайная величина X могла принять одно из следующих возможных значений: 0, 1, 2, ..., 10. Эти значения отделены одно от другого промежутками, в которых нет возможных значений X . Таким образом, в этом примере случайная величина принимает отдельные, дискретные возможные значения. Во втором примере случайная величина могла принять любое из значений в промежутке (a, b) . Здесь нельзя отделить одно возможное значение от другого промежутком, не содержащим возможных значений случайной величины.

Уже из сказанного можно сделать заключение о целесообразности различать случайные величины, принимающие лишь отдельные, дискретные значения, и случайные величины, возможные значения которых непрерывно заполняют некоторый промежуток.

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

Непрерывной называют случайную величину, которая может принимать все значения из некоторого конечного или бесконечного промежутка. Количество возможных значений непрерывной случайной величины бесконечно.

Замечание. Настоящее определение непрерывной случайной величины не является точным. Более точное определение будет дано ниже.

2.2.2. Законы распределения случайной величины

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

- Для получения закона распределения используют три способа:
- табличный (таблица)
 - графический (рис. 2.1)
 - аналитический – для дискретных и непрерывных величин.

Табличный закон распределения

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

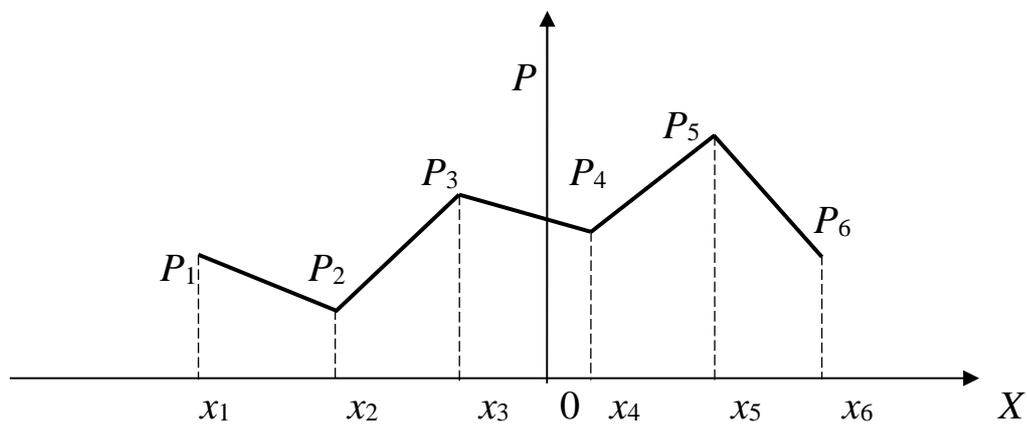


Рис. 2.1. Многоугольник распределения

Непрерывную случайную величину нельзя задать графиком или таблицей. Ее можно задать только аналитически, для чего вводят понятие: *функция распределения вероятности случайной величины* или просто *функция распределения*.

2.2.3. Функция распределения вероятности случайной величины

Функцией распределения вероятности случайной величины называют функцию $F(x)$, определяющую вероятность того, что случайная величина X в результате испытания примет значение, меньшее x , т. е.

$$F(x) = P(X < x). \quad (2.22)$$

Геометрически это равенство можно истолковать так: $F(x)$ есть вероятность того, что случайная величина примет значение, которое изображается на числовой оси точкой, лежащей левее точки x .

Далее можно дать более точное определение непрерывной случайной величины: случайную величину называют *непрерывной*, если ее функция распределения есть непрерывная, кусочно-дифференцируемая функция с непрерывной производной.

Функция распределения имеет ряд свойств:

1) функция распределения есть неотрицательная величина, принимающая значения от 0 до 1.

2) она является неубывающей функцией, т. е. при $x_2 > x_1$

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

3) вероятность того, что случайная величина примет значение, принадлежащее интервалу (a, b) , равна приращению функции распределения на этом интервале

$$P(a \leq X < b) = F(b) - F(a);$$

4) функция распределения от минус бесконечности равна нулю

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

5) функция распределения от плюс бесконечности равна единице

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

6) вероятность того, что непрерывная случайная величина X примет одно определенное значение, равна нулю, так как непрерывная случайная величина может принимать бесконечное количество значений. Однако было бы неправильным думать, что событие $X = x_1$ невозможно, поскольку в результате испытания случайная величина обязательно примет одно из возможных значений; это значение может оказаться равным x_1 .

Пример. Дискретная случайная величина X задана таблицей распределения

X	2	8	16
p	0,3	0,1	0,6

Найти функцию распределения и вычертить ее график.

Решение. Если $x \leq 2$, то $F(x) = 0$.

Если $2 < x \leq 8$, то $F(x) = 0,3$. Действительно, X может принять значение 2 с вероятностью 0,3.

Если $8 < x \leq 16$, то $F(x) = 0,4$. Действительно, если x_1 удовлетворяет неравенству $8 < x_1 \leq 16$, то $F(x_1)$ равно вероятности события $X < x_1$, которое может быть осуществлено, когда X примет значение 2 (вероятность этого события равна 0,3) или значение 8 (вероятность этого события равна 0,1). Поскольку эти два события несовместны, то по теореме сложения вероятность события $X < x_1$ равна сумме вероятностей $0,3 + 0,1 = 0,4$.

Если $x > 16$, то $F(x) = 1$. Действительно, событие $X \leq 16$ достоверно, следовательно, его вероятность равна единице.

Итак, функция распределения аналитически может быть записана в виде

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 2, \\ 0,3 & \text{при } 2 < x \leq 8, \\ 0,4 & \text{при } 8 < x \leq 16, \\ 1 & \text{при } x > 16. \end{cases}$$

График этой функции приведен на рис. 2.2.

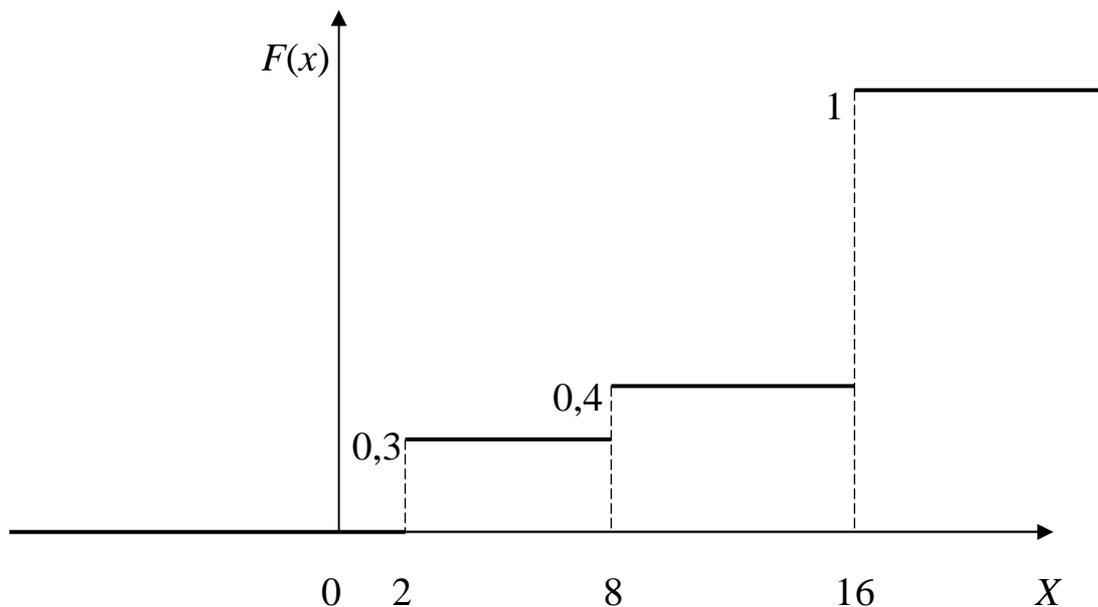


Рис. 2.2. График функции распределения заданной случайной величины

2.2.4. Плотность распределения вероятности непрерывной случайной величины

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

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = F'(x). \quad (2.23)$$

Плотностью распределения можно задать только непрерывную случайную величину.

График плотности распределения называют *кривой распределения*.

Свойства плотности распределения:

1) плотность распределения есть функция неотрицательная:

$$f(x) \geq 0; \quad (2.24)$$

2) функция распределения равна интегралу от плотности распределения в пределах $[-\infty; x]$:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx; \quad (2.25)$$

3) вероятность попадания случайной величины в интервал (a, b) равна определенному интегралу от плотности распределения

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a); \quad (2.26)$$

4) несобственный интеграл от плотности распределения равен единице:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = F(+\infty) - F(-\infty) = 1 - 0 = 1; \quad (2.27)$$

5) если возможные значения случайной величины принадлежат только интервалу (a, b) , то

$$\int_a^b f(x) dx = 1. \quad (2.28)$$

2.2.5. Числовые характеристики случайных величин

1. *Математическое ожидание* – характеристика (координата) центра группирования значений случайных величин:

– для дискретных случайных величин математическим ожиданием называют сумму произведений всех ее возможных значений на их вероятности:

$$M(x) = \sum_{i=1}^n X_i P_i(x_i); \quad (2.29)$$

– для непрерывных случайных величин:

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx. \quad (2.30)$$

Свойства математического ожидания:

Свойство 1. *Математическое ожидание постоянной величины равно этой величине:*

$$M(C) = C. \quad (2.31)$$

Свойство 2. *Постоянный множитель можно выносить за знак математического ожидания:*

Математическое ожидание случайной величины CX :

$$M(CX) = Cx_1p_1 + Cx_2p_2 + \dots + Cx_np_n = C(x_1p_1 + x_2p_2 + \dots + x_np_n) = CM(X). \\ M(CX) = CM(X). \quad (2.32)$$

Свойство 3. *Математическое ожидание суммы двух случайных величин равно сумме их математических ожиданий:*

$$M(X + Y) = M(X) + M(Y). \quad (2.33)$$

Свойство 4. *Математическое ожидание произведения двух независимых случайных величин равно произведению их математических ожиданий:*

$$M(XY) = M(X)M(Y). \quad (2.34)$$

Примечание. Математическое ожидание не есть случайная величина, она постоянна:

$$M(M(C)) = M(C) = C. \quad (2.35)$$

2. *Модой* непрерывной случайной величины называется то её значение, при котором плотность вероятности наибольшая (т. M_0 на рис. 2.3). Модой дискретной случайной величины называется ее наиболее вероятное значение.

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

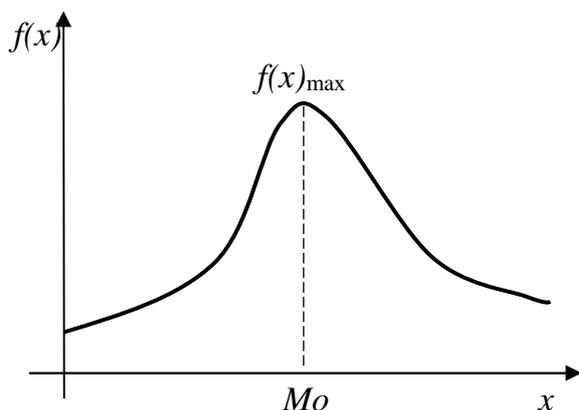


Рис. 2.3. График плотности вероятности для определения моды случайной величины

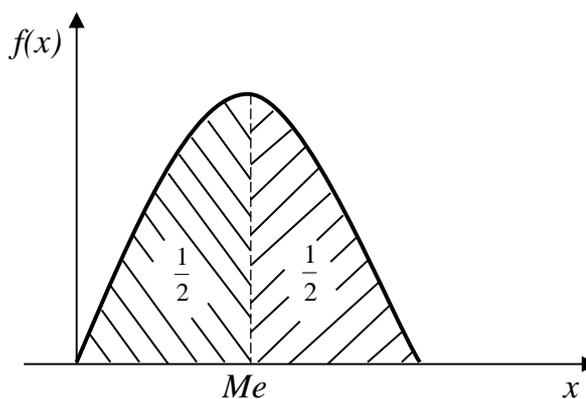


Рис. 2.4. График плотности вероятности для определения медианы случайной величины

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

5. *Дисперсия* характеризует разброс значений случайной величины относительно математического ожидания.

Дисперсия есть математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от её математического ожидания:

– для дискретных случайных величин

$$D(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - M(x))^2 P(x_i); \quad (2.36)$$

– для непрерывных случайных величин:

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M(x))^2 f(x) dx. \quad (2.37)$$

Для вычисления дисперсии часто бывает удобно пользоваться следующей формулой:

$$D(x) = M(x^2) - [M(x)]^2. \quad (2.38)$$

Дисперсия равна разности между математическим ожиданием квадрата случайной величины X и квадратом ее математического ожидания.

Свойства дисперсии:

Свойство 1. Дисперсия постоянной величины C равна нулю:

$$D(C) = 0. \quad (2.39)$$

Свойство 2. Постоянный множитель можно выносить за знак дисперсии, возводя его в квадрат:

$$D(Cx) = C^2 D(x). \quad (2.40)$$

Свойство 3. Дисперсия суммы двух независимых случайных величин равна сумме дисперсий этих величин:

$$D(x + y) = D(x) + D(y). \quad (2.41)$$

Свойство 4. Дисперсия разности двух независимых случайных величин равна сумме их дисперсий:

$$D(x - y) = D(x) + D(y). \quad (2.42)$$

6. Среднее квадратическое отклонение характеризует разброс значений случайной величины относительно математического ожидания и имеет размерность самой случайной величины:

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)}. \quad (2.43)$$

7. Коэффициент вариации характеризует разброс значений случайной величины относительно математического ожидания и является безразмерной величиной:

$$v(x) = \frac{\sigma(x)}{M(x)}, \quad (2.44)$$

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

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

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

Пример 1. Закон распределения случайной величины задан в виде таблицы:

x	1	3	5
$P(x)$	0,1	0,4	0,5

Определить числовые характеристики случайных величин.

Решение.

$$M(x) = 1 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,5 = 3,8$$

$$D(x) = (1 - 4,3)^2 \cdot 0,1 + (3 - 4,3)^2 \cdot 0,4 + (5 - 4,3)^2 \cdot 0,5 = 1,76$$

$$\sigma(x) = \sqrt{2,059} = 1,435$$

$$v(x) = \frac{\sigma(x)}{M(x)} = 0,38.$$

Пример 2. Функция распределения имеет вид

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

Оценить количественно, чему равна вероятность того, что случайная величина примет значение из диапазона (0,5; 1). Какова вероятность противоположного события, т. е. попадания случайной величины в диапазон (0; 0,5)?

Решение.

Вероятность попадания случайной величины в диапазон (0,5; 1) равна

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

Вероятность попадания случайной величины в диапазон (0; 0,5) равна

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

Контрольные вопросы и задачи

1. Сформулируйте классическое определение вероятности.
2. Как можно определить вероятность безотказной работы объекта, зная количество объектов, отказавших за определенный промежуток времени, и общее количество таких объектов?
3. Какими способами можно задать случайную величину?
4. Поясните теоремы о сложении и умножении вероятностей.
5. В чем смысл теоремы Байеса?
6. Случайная величина задана с помощью закона распределения вероятности:

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

Известно, что $M(x) = 0$.

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

7. Функция распределения имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0, \\ 2x & \text{при } 0 < x \leq 0,5, \\ x & \text{при } 0,5 < x \leq 1, \\ 0 & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

Найти вероятность того, что распределенная по этому закону случайная величина примет значение из диапазона $[0,25; 0,75]$. Ответ: 0,625.

8. Техническая система может находиться в двух рабочих состояниях. В первом состоянии техническая система работает 60 % времени, во втором – 40 % времени. При этом вероятность безотказной работы для первого состояния составляет 0,97, а для второго – 0,99. Определить вероятность отказа технической системы. Ответ: 0,978.

9. Техническая система состоит из трех элементов, соединенных последовательно (рисунок). Отказ каждого из элементов приводит к отказу всей системы. Вероятность того, что за время T работы технической системы откажет первый элемент, равна 0,03, второй – 0,02, третий – 0,04. Найти вероятность того, что время T прибор проработает безотказно.

Ответ: 0,912576.

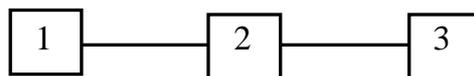


Схема технической системы

10. Техническая система состоит из двух элементов, соединенных параллельно (рисунок). Вероятность безотказной работы каждого элемента равна 0,85. Отказ технической системы произойдет при одновременном отказе обоих элементов. Найти вероятность безотказной работы технической системы.

Ответ: 0,9775.

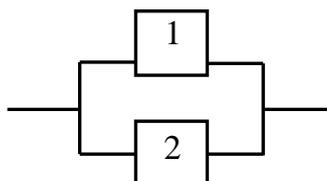


Схема технической системы

Глава 3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТА

3.1. Теория надежности и законы распределения случайных величин

При исследовании надежности технических систем приходится оперировать различными случайными величинами. Для их описания с достаточной степенью точности можно использовать специально разработанные статистические модели.

Статистические модели получают следующим образом:

1. В результате испытаний или наблюдений за эксплуатацией технических систем накапливают информацию об отказах, а затем, исходя из полученных результатов, при помощи методов математической статистики разрабатывают статистическую модель.

2. На основании накопленных ранее знаний о поведении технических систем в похожих режимах эксплуатации задается статистическая модель для конкретной ситуации, по ней определяются характеристики надежности будущих объектов.

Второй путь основан на существовании первого.

Исходными данными для определения закона распределения является эмпирическая плотность распределения, т. е. наблюдаемые значения случайной величины, сгруппированные по частотам появления. По опытным данным строится график плотности распределения (или гистограмма). Пример такого построения представлен на рис. 3.1.

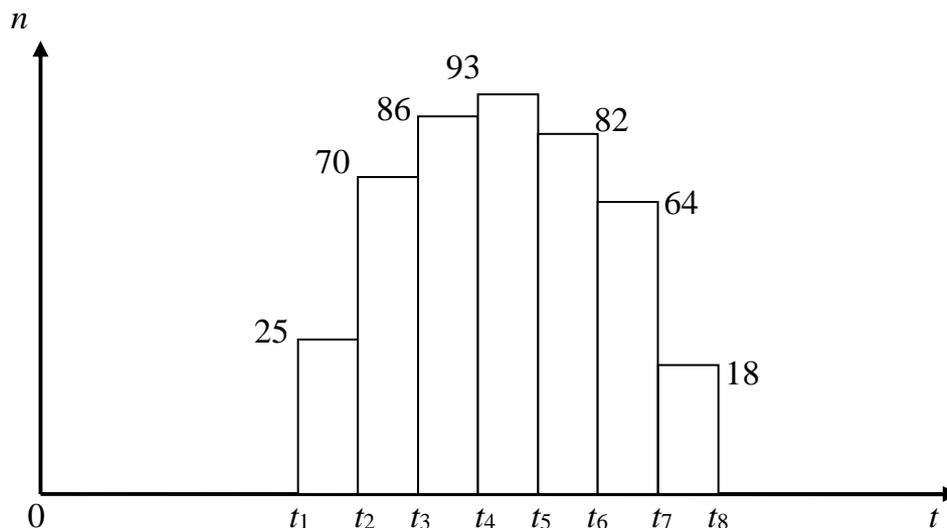


Рис. 3.1. Построение гистограммы плотности распределения параметра

В нашем случае приведены данные испытаний партии из 438 изделий по наработке на отказ, где t – наработка на отказ. Результаты испытаний приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты испытания партии изделий на наработку на отказ

Интервал наработки на отказ	Количество изделий, имеющих наработку на отказ, попадающую в данный интервал
$(t_1; t_2)$	25
$(t_2; t_3)$	70
$(t_3; t_4)$	86
$(t_4; t_5)$	93
$(t_5; t_6)$	82
$(t_6; t_7)$	64
$(t_7; t_8)$	18

По гистограмме распределения наработки на отказ можно сделать вывод о том, что в данном случае применим нормальный закон распределения.

Рассмотрим основные распределения, наиболее часто встречающиеся при исследовании надежности технических систем в разные периоды эксплуатации.

3.2. Надежность в период нормальной эксплуатации

В этот период постепенные отказы еще не возникают, и надежность объекта характеризуется *внезапными отказами*. Эти отказы вызваны воздействием внешних факторов, происходят с постоянной интенсивностью, которая не зависит от наработки объекта $\lambda = \lambda(t) = const$:

$$\lambda = \frac{1}{T_{cp}}, \quad (3.1)$$

где $T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$ – среднее значение (математическое ожидание) наработки до отказа; t_i – наработка до отказа i -го изделия.

В этот период надежность изделий подчиняется экспоненциальному закону распределения.

Интенсивность отказов (a), функция распределения (b), плотность распределения (v), вероятность безотказной работы (z) приведены в виде зависимостей и в виде графиков на рис. 3.2.

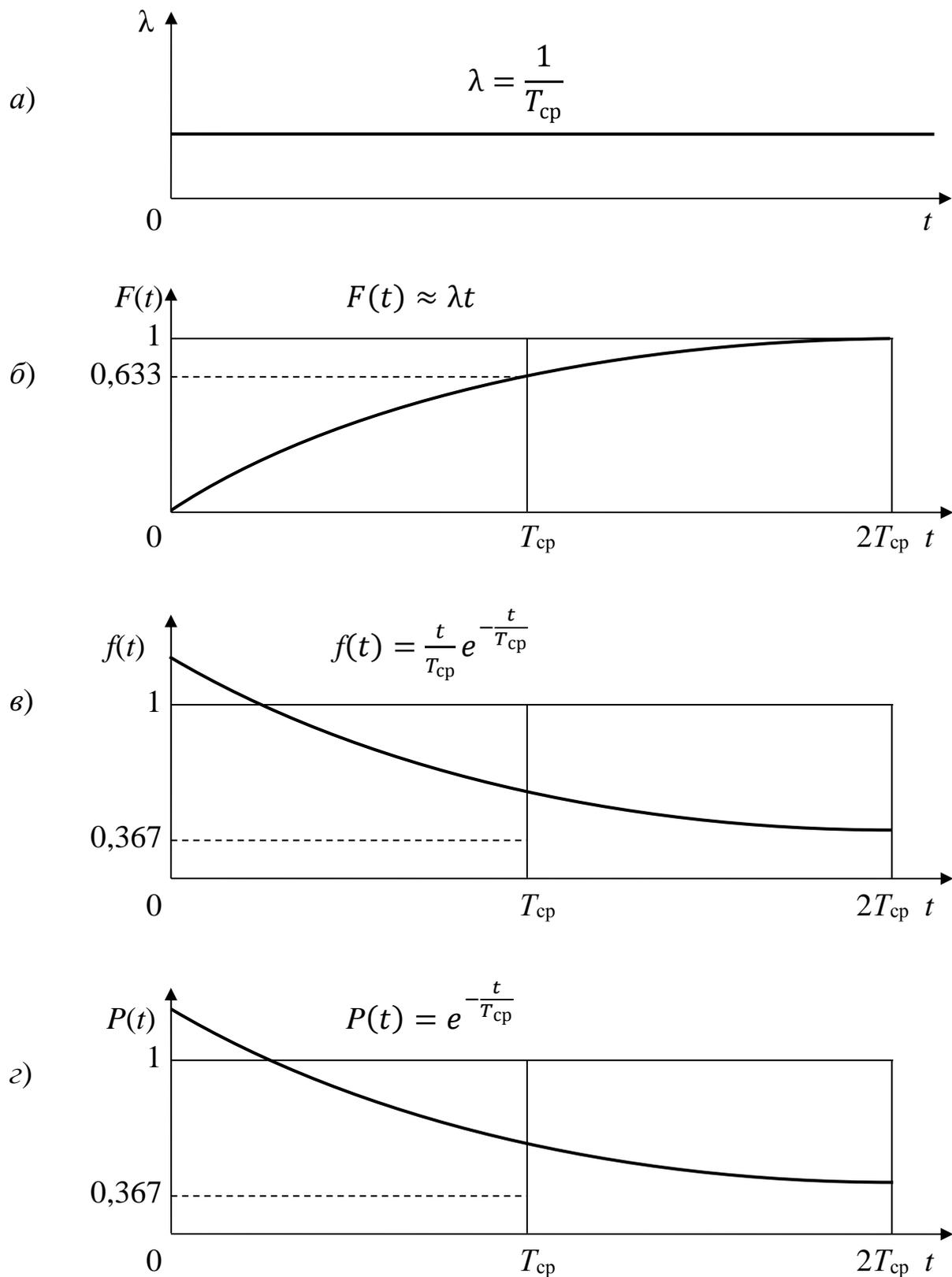


Рис. 3.2. Интенсивность отказов, функция распределения, плотность распределения и вероятность безотказной работы при экспоненциальном распределении

$$F(t) = Q(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\frac{t}{T_{cp}}};$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = \frac{t}{T_{cp}} e^{-\frac{t}{T_{cp}}}; \quad (3.2)$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}.$$

Вероятность безотказной работы при экспоненциальном распределении приведена в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Вероятность безотказной работы при экспоненциальном распределении

$\lambda t = \left(\frac{t}{T_{cp}}\right)$	1,0	0,1	0,01	0,001	0,0001
$P(t)$	0,367	0,9	0,99	0,999	0,9999

Таким образом, при наработке технической системы, равной средней наработке, вероятность безотказной работы $P(t) \approx 0,37$. Другими словами, 63 % отказов возникает при наработке, меньшей T_{cp} , и только 37 % позднее. Для обеспечения высокой вероятности безотказной работы можно использовать только очень малую долю среднего срока службы.

Приближенно можно считать

$$P(t) \approx 1 - \lambda t, \quad (3.3)$$

$$Q(t) \approx \lambda t. \quad (3.4)$$

Особенностью данного распределения является то, что вероятность появления события на интервале времени длительностью Δt не зависит от длительности предшествующего промежутка времени, на котором событие не появилось, а зависит только от длительности периода Δt при заданной интенсивности событий.

3.3. Надежность в период постепенных отказов

Наиболее часто при эксплуатации технических систем в самый первый период (достаточно короткий) происходит довольно много отказов. Это так называемый период обкатки или приработки. В этот период проявляются заводские дефекты. Далее следует режим нормальной работы, когда отказов возникает немного. По мере расходования ресурса отказов все больше, но при достижении среднего ре-

сурса количество отказов быстро падает из-за уменьшения количества оставшихся работоспособными экземпляров технических систем, находящихся в эксплуатации. Для описания постепенных отказов нужно использовать такие законы распределения времени безотказной работы, которые дают подобное распределение. Рассмотрим некоторые из них.

3.3.1. Закон нормального распределения

Нормальное распределение имеет место, когда отклонение случайной величины вызвано действием нескольких примерно равнозначных и независимых (или слабо зависимых) друг от друга факторов. Так как на практике часто встречаются именно такие условия, то нормальное распределение возникает наиболее часто. Нормальному распределению подчиняются: наработка на отказ восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий; размеры при изготовлении и погрешности измерения деталей; механические характеристики материалов (пределы текучести, прочности, выносливости) и т. д.

Плотность распределения при нормальном распределении описывается формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-M(x))^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (3.5)$$

из которой видно, что оно определяется двумя параметрами – математическим ожиданием $M(x)$ и средним квадратическим отклонением σ_x .

Общим называют нормальное распределение с произвольными параметрами $M(x)$ и σ_x ($\sigma_x > 0$).

Нормированным называют нормальное распределение с параметрами $M(x) = 0$ и $\sigma_x = 1$.

Графически этот закон интерпретируется кривой Гаусса с максимумом при $x = M(x)$ (рис. 3.3):

$$f(x)_{max} = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} = \frac{0,399}{\sigma_x}. \quad (3.6)$$

Параметр σ_x характеризует ширину кривой плотности распределения, а следовательно, и остроту кривой. Действительно, вся площадь под кривой, выражающая вероятность достоверного события, не зависит от формы и всегда должна быть равна единице. Соответственно более узкая кривая должна быть более высокой и наоборот.

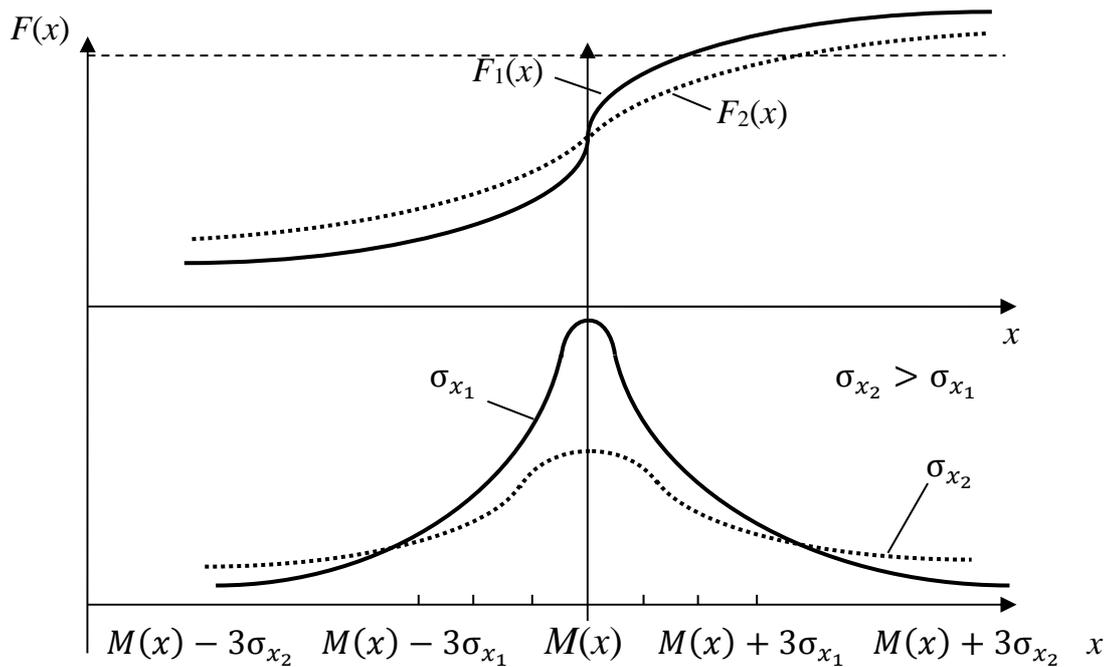


Рис. 3.3. Функция и плотность нормального закона распределения

Функция плотности распределения, подчиняющаяся нормальному закону распределения, определена в диапазоне от $x = -\infty$ до $x = +\infty$, однако это не является существенным недостатком, так как площадь, очерченная уходящими в бесконечность ветвями на диапазонах $-\infty < x < M(x) - 3\sigma_x$ и $M(x) + 3\sigma_x < x < +\infty$, составляет всего 0,27 %. Таким образом, вероятность отказа за границами $\pm 3\sigma_x$ не превышает 0,27 % и обычно не учитывается при расчетах. Функция нормального распределения определяется интегрированием функции плотности распределения

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma_x} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-M(x))^2}{2\sigma_x^2}} dx. \quad (3.7)$$

Интеграл такого вида не выражается через элементарные функции.

Решение в этом случае проводится заменой переменных в интеграле, введением квантили

$$u = \frac{x-M(x)}{\sigma_x} \quad (3.8)$$

и переходом к нормированному распределению ($M(x) = 0, \sigma_x = 1$).

Пропуская вывод уравнения, запишем

$$F(x) = 0,5 + \Phi(u), \quad (3.9)$$

где $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$ – интеграл Лапласа.

Как правило, функцией нормального распределения описывается вероятность отказа в заданном интервале времени $F(x) = Q(x)$. Таким образом, вероятность безотказной работы будет

$$P(t) = 1 - Q(t) = 0,5 - \Phi(u) = \varphi(u), \quad (3.10)$$

где $u = \frac{t-M(t)}{\sigma_t}$ – квантиль нормального распределения (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Связь $P(t)$ с квантилью u

Квантиль u	Вероятность безотказной работы $P(t)$	Квантиль u	Вероятность безотказной работы $P(t)$	Квантиль u	Вероятность безотказной работы $P(t)$
0,0	0,5000	-0,7	0,7580	-2,000	0,9772
-0,1	0,5398	-0,8	0,7881	-2,200	0,9861
-0,2	0,5793	-0,9	0,8159	-2,326	0,9900
-0,3	0,6179	-1,0	0,8413	-2,500	0,9938
-0,4	0,6552	-1,282	0,9000	-3,090	0,9990
-0,5	0,6915	-1,400	0,9192	-3,500	0,9998
-0,6	0,7257	-1,600	0,9452	-3,719	0,9999

Пример 1.

Определить вероятность $P(t)$ безотказной работы технической системы в течение времени $t = 1,5 \cdot 10^4$ ч, если ее ресурс подчиняется нормальному закону распределения с параметрами: $M(t) = 4 \cdot 10^4$ ч, $\sigma = 10^4$ ч.

Решение.

$$u = \frac{1,5 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4}{10^4} = -2,5.$$

По табл. 3.3 определяем $P(t) = 0,9938$.

Помимо прямой задачи – оценки вероятности безотказной работы за данную наработку – часто требуется решить обратную задачу – определить наработку, соответствующую заданной вероятности безотказной работы.

Пример 2.

Оценить 90-процентный ресурс технической системы, если известно, что ее долговечность ограничена и ресурс подчиняется нормальному закону распределения с параметрами: $M(t) = 4 \cdot 10^4$ ч, $\sigma = 10^4$ ч.

Решение.

$$t = \sigma u + M(t).$$

При $P(t) = 0,9$ квантиль $u = -1,282$, следовательно,
 $t = 10^4(-1,282) + 4 \cdot 10^4 = 2,718$ ч.

3.3.2. Логарифмически нормальное распределение

В ряде случаев характер распределения отказов становится явно асимметричным. Иногда его удается свести к симметричному (т. е. нормальному), если в качестве аргумента рассматривать не само время наступления отказа, а его логарифм

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_{\ln t} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma_{\ln t}^2}}, \quad (3.11)$$

где μ – математическое ожидание логарифма времени; $\sigma_{\ln t}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма времени.

По результатам испытания μ и $\sigma_{\ln t}$ определяют по формулам:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln t_i; \quad \bar{\sigma}_{\ln t} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln t_i - \bar{\mu})^2}. \quad (3.12)$$

Вероятность безотказной работы можно определить по таблице для нормального распределения в зависимости от квантили, которая вычисляется как

$$u = \frac{(\ln t - \mu)}{\sigma_{\ln t}} \rightarrow P(t)_{\text{табл.}} \quad (3.13)$$

Логарифмически нормальное распределение справедливо при любом основании логарифма, но наиболее употребительны десятичные и натуральные логарифмы.

Данное распределение хорошо моделирует отказы, возникающие вследствие накопления элементарных повреждений в материале деталей, поэтому оно применяется в качестве одной из статистических моделей для описания усталостных отказов, которые происходят в результате постепенного суммирования внутренних дефектов металла.

3.3.3. Распределение Вейбулла

Распределение Вейбулла соответствует более общей статистической модели, чем предыдущие виды распределений, и описывает различные законы изменения случайной величины с течением времени.

Плотность распределения Вейбулла описывается зависимостью

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}. \quad (3.14)$$

Как видно из формулы, это распределение двухпараметрическое: параметр a называют параметром масштаба; параметр b – параметром формы.

Функция распределения в данном случае имеет вид

$$F(t, a, b) = Q(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}. \quad (3.15)$$

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}. \quad (3.16)$$

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}. \quad (3.17)$$

Средняя наработка на отказ

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt = a \Gamma, \quad (3.18)$$

где Γ – табулированная гамма-функция.

Математическое ожидание

$$M(t) = ta. \quad (3.19)$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_t = ca. \quad (3.20)$$

Здесь m и c – коэффициенты, выбираемые по табл. 3.4.

Таблица 3.4

Коэффициенты распределения Вейбулла

Параметр b	m	c	Параметр b	m	c
0,400	3,32	10,4	1,0	1,00	1,00
0,455	2,42	6,22	1,2	0,941	0,787
0,500	2,00	4,47	1,6	0,897	0,574
0,625	1,43	2,39	2,0	0,886	0,463
0,833	1,10	1,33	2,5	0,887	0,380

Возможности и универсальность распределения Вейбулла определяются следующими его особенностями:

– при $b < 1$ плотность распределения $f(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$ убывают при увеличении наработки, т. е. теоретически можно описать приработочный износ;

– при $b = 1$ распределение Вейбулла имеет вид экспоненциального распределения $\lambda(t) = \text{const}$, что соответствует нормальной работе изделия после приработки;

– при $b > 1$ плотность распределения $f(t)$ одновершинная, а интенсивность отказов $\lambda(t)$ возрастает с течением времени, т. е. описывается процесс постепенных отказов. Варианты этого случая: $b = 2$ – это распределение Рэлея; при $b = 3,3$ распределение Вейбулла близко к нормальному распределению.

3.4. Совместное действие внезапных и постепенных отказов

Вероятность безотказной работы в этом случае определяется произведением вероятностей внезапных и постепенных отказов

$$P(t) = P_B(t)P_{\Pi}(t) = e^{-\lambda t} \frac{P(T+t)}{P(t)}. \quad (3.21)$$

Контрольные вопросы и задачи

1. Что является причиной отказов в период нормальной эксплуатации технической системы?

2. Известно, что техническая система имеет экспоненциальное распределение наработки до отказа с параметром $\lambda = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$. Назначенный ресурс технической системы составляет $T_n = 10^5 \text{ ч}$. Определить вероятность того, что деталь безотказно проработает в интервале наработки $[0, T_n]$.

Ответ: 0,9901.

3. Почему распределение Гаусса называют нормальным распределением?

4. Какими параметрами определяется плотность распределения при нормальном законе распределения?

5. Какие виды распределений описывают надёжность технической системы в период постепенных отказов?

Глава 4. СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Структурная схема надежности технической системы

Расчёт надежности технических систем производится с целью выбора лучших конструктивных решений, режимов эксплуатации, организации оптимального режима технического обслуживания и ремонта. Главные задачи при этом – выявление наиболее ненадежных элементов и определение наиболее эффективных мер повышения показателей надежности этих элементов. Наиболее точное решение подобных задач возможно после предварительного структурно-логического анализа системы.

Большинство технических объектов представляют собой сложные системы, состоящие из отдельных деталей, узлов и агрегатов, устройств контроля, управления и т. д. Техническая система (ТС) – совокупность технических устройств (элементов), предназначенных для выполнения определенной функции или функций. Соответственно элемент – составная часть системы. Расчленение ТС на элементы достаточно условно и зависит от постановки задачи при расчете надежности. Например, при анализе работоспособности технологической линии её элементами могут считаться отдельные станки, транспортные и загрузочные устройства и различное вспомогательное оборудование. В свою очередь, станки и устройства также могут считаться техническими системами и, таким образом, при оценке их надежности должны быть разделены на составляющие их элементы – сборочные единицы, детали и подсистемы.

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

1. Элементы, состояние которых не влияет на работоспособность системы (например, изменение окраски поверхности или наличие вмятин или царапин на декоративных элементах и т. п.).

2. Элементы, работоспособность которых за время эксплуатации не меняется и вероятность безотказной работы близка к единице (корпусные детали, станины, детали с очень большим запасом прочности).

3. Элементы, ремонт, регулировка или замена которых возможна в процессе эксплуатации изделия или во время планового технического обслуживания (замена сменных элементов, корректирующие регулировки, замена инструмента и т. д.).

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

Очевидно, что при анализе надежности технических систем целесообразно рассматривать только элементы последней группы.

В первую очередь необходимо выявить наиболее слабые элементы системы, для чего требуется составить структурную схему технической системы. Для этого изделие условно разбивают на элементы, а затем рассматривают влияние отказа каждого отдельно взятого элемента на надёжность всего объекта.

Вводятся следующие определения:

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

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

При составлении структурной схемы придерживаются следующих правил:

– элементы изображаются в виде прямоугольников и обозначаются номерами или индексами (например, 1 или А);

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

– элемент считается работоспособным, если сигнал проходит по элементу от входа до выхода;

– при отказе элемента прохождение сигнала по нему невозможно;

– отказы могут происходить только внутри элементов, а не на линиях связи между ними.

Системы различаются:

– по характеру выполняемых работ;

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

– по операциям, выполняемым ТС в ходе рабочего цикла.

В зависимости от цели исследования глубина анализа может быть различной. Для оценки критериев надежности ТС будет доста-

точно представить составляющие её элементы в виде отдельных сборочных единиц (двигатель, корпус, насос, вентилятор, фильтр, воздухопровод и т. п.).

Если же поставлена задача оптимизации конструкции отдельных элементов ТС, то глубина анализа должна быть больше и доходить до уровня отдельных деталей.

Цель расчёта надёжности:

- выяснить, достижима ли требуемая надёжность при существующей технологии конструирования и производства данного вида ТС;
- обосновать выбор того или иного конструктивного решения;
- выяснить возможность и целесообразность резервирования отдельных составляющих ТС подсистем.

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

- 1) рассматриваются выполняемые технической системой и её составными частями функции;
- 2) изучаются взаимосвязи составляющих ТС элементов;
- 3) для данной ТС уточняется понятие «безотказной работы»;
- 4) определяются возможные отказы ТС и составляющих её частей, причины отказов и их возможные последствия;
- 5) производится оценка влияния отказов составных частей системы на её работоспособность в целом;
- 6) в системе выделяются элементы с заранее известными показателями надёжности;
- 7) составляется модель безотказной работы ТС в виде структурно-логической схемы;
- 8) на основании данных по надёжности составных частей ТС с учетом структурно-логической схемы составляются расчётные зависимости для определения показателей надёжности;
- 9) для решения поставленной задачи на основании результатов расчёта характеристик надёжности ТС делают выводы и принимают решения о необходимых мерах по повышению надёжности (установление определённого режима профилактического обслуживания, изменение или доработка элементной базы, резервирование отдельных элементов или узлов, номенклатура и количество запасных элементов для ремонта и т. д.)

Структурно-логические схемы надёжности ТС графически отображают взаимосвязь составных частей ТС и их влияние на работоспособность системы в целом. Структурно-логическая схема представляет собой совокупность выделенных ранее элементов ТС, соединенных друг с другом последовательно или параллельно. Критерием для определения вида соединения элементов (последовательного или параллельного) при построении схемы являются особенности влияния их отказа на работоспособность ТС.

Последовательным (с точки зрения надёжности) считается соединение, при котором отказ любого элемента приводит к отказу всей системы (рис. 4.1).

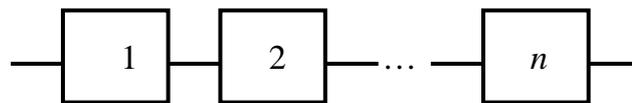


Рис. 4.1. Последовательное соединение элементов системы

Наиболее наглядным примером последовательных систем могут служить автоматические станочные линии без резервных цепей и накопителей.

Параллельным (с точки зрения надёжности) считается соединение, при котором отказ каждого отдельно взятого элемента не приводит к отказу системы до тех пор, пока не откажут все соединенные вместе элементы (рис. 4.2).

Примером параллельных систем являются многомоторные самолеты, восьмиколесные бронетранспортеры, резервные системы и т. д.

Не всегда структурная схема надёжности аналогична конструктивной или электрической схеме расположения элементов. Например, подшипники на валу автомобильного колеса работают конструктивно параллельно друг с другом, однако выход из строя любого из них приводит к отказу системы в целом. Эти элементы с точки зрения надёжности образуют последовательное соединение.

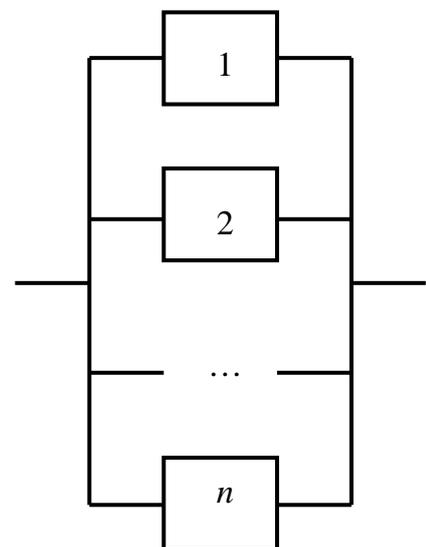


Рис. 4.2. Параллельное соединение элементов системы

4.2. Расчёт надёжности систем с последовательным соединением элементов

Работоспособность системы с последовательным соединением элементов обеспечивается тогда и только тогда, когда все n элементов системы находятся в работоспособном состоянии (рис. 4.3).

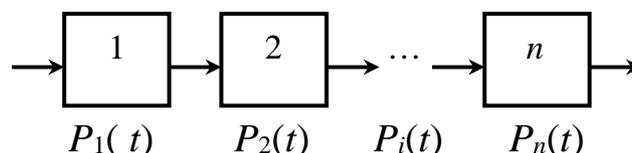


Рис. 4.3. Расчётная схема последовательного соединения элементов

Безотказность работы i -го элемента зависит от безотказности других элементов: Вероятность безотказной работы технической системы $P_c(t)$ за время t :

$$P_c(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_i(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (4.1)$$

Вероятность отказа технической системы $Q_c(t)$ за время t :

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (4.2)$$

Вероятность безотказной работы i -го элемента для экспоненциального закона распределения за время t :

$$P_i(t) = e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt}, \quad (4.3)$$

таким образом, принимая $\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$, получим

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \lambda_c(t) dt}, \quad (4.4)$$

$$Q(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt}. \quad (4.5)$$

Если все элементы одинаковые, то:

1) при $n = 10$

$$P_1 = P_2 = \dots = P_i = \dots P_{10};$$

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

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

$$P_c(t) = 0,99^{10} = 0,9044;$$

2) при $n = 100$

$$P_c(t) = 0,366;$$

3) при $n = 1000$

$$P_c(t) = 4,3171 \cdot 10^{-5}.$$

Из (4.3) и (4.4) следует, что для системы из n элементов с одинаковой надёжностью ($\lambda = \lambda_1$) верны условия:

$$\lambda_c = n\lambda; \quad (4.6)$$

$$T_0 = \frac{T_{0i}}{n}; \quad (4.7)$$

т. е. интенсивность отказов в n раз больше, а средняя наработка в n раз меньше, чем у каждого из составляющих систему элемента. При последовательном соединении общая надёжность системы ниже надёжности самого слабого её элемента. При очень большом количестве элементов, даже если все составляющие элементы обладают очень высокой надёжностью, вся система может оказаться настолько ненадёжной, что её эксплуатация будет невозможна.

Повысить надёжность такой системы можно следующими путями:

- увеличение надёжности составных элементов;
- сокращение количества элементов;
- уменьшение времени эксплуатации.

4.3. Расчёт надёжности системы с параллельным соединением элементов

Отказ системы произойдёт при отказе всех элементов (рис. 4.4).

$$Q_c(t) = Q_1(t)Q_2(t) \dots Q_i(t) \dots Q_n(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t), \quad (4.8)$$

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)). \quad (4.9)$$

Например, при $P_i(t) = 0,6$, $n = 5$ $P(t) = 1 - (1 - 0,6)^5 = 0,9898$.

При параллельном соединении можно сформировать надёжную конструкцию из самых ненадёжных элементов, так как $(P(t) + Q(t))^m = 1$, где m – количество элементов.

Например, при $m = 2$

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

где P^2 означает вероятность безотказной работы обоих элементов;

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

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

Q^2 – вероятность отказа обоих элементов;

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

при $m = 3$

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

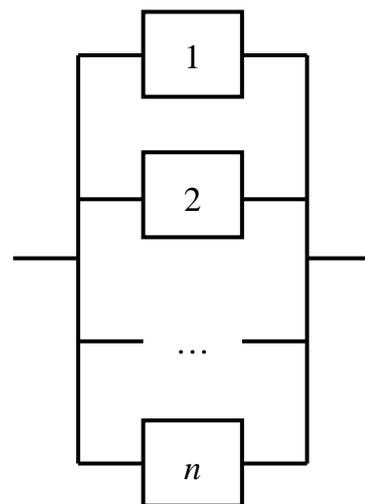


Рис. 4.4. Расчетная схема параллельного соединения элементов

где P^3 – все три элемента работоспособны;
 $3P^2Q$ – из строя выйдет не более одного элемента;
 $3QP^2$ – из строя выйдет не более двух элементов;
 Q^3 – из строя выйдут все три элемента.

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

При экспоненциальном распределении наработки выражение (4.9) принимает вид

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n, \quad (4.10)$$

откуда после интегрирования и преобразований средняя наработка системы определяется

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}, \quad (4.11)$$

где $T = 1/\lambda$ – средняя наработка элемента.

При больших значениях n справедлива приближенная формула

$$T_0 = T_{0i} \left(\ln n + \frac{1}{2n} + 0,577 \right). \quad (4.12)$$

Таким образом, средняя наработка системы с параллельным соединением больше средней наработки составляющих её элементов.

4.4. Анализ сложных систем

Недостаточная надёжность проектируемой или существующей технической системы может стать проблемой, решение которой потребует больших материальных затрат или займёт много времени (например, отказ от производства ТС и замена ее новой, более совершенной; повышение надёжности существующей системы до требуемого уровня; улучшение условий эксплуатации существующей системы и т. д.).

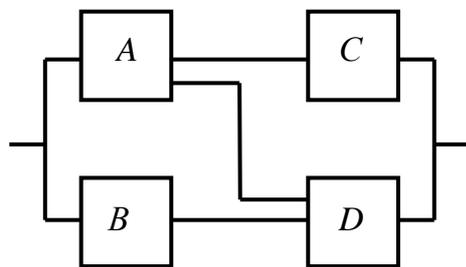


Рис. 4.5. Система со сложным соединением элементов

На практике встречаются системы, для описания которых параллельное или последовательное соединение не годится. Примерами систем со сложным соединением элементов могут быть дорожная сеть, соединение энергетических систем и др. В качестве примера показана система, изображённая на рис. 4.5.

Здесь отказ элемента A нарушает сразу два пути AB и AD . Таким образом, это соединение не является параллельным. Последовательным такое соединение назвать также нельзя: в случае отказа элементов B и C система остаётся работоспособной.

Для определения вероятности безотказной работы системы или надёжности её функционирования используют несколько методов. Самый простой из этих методов – метод прямого перебора. Он позволяет рассмотреть влияние отказов элементов на работу системы, т. е. на устойчивость функционирования системы в целом. С помощью этого метода можно определить надёжность работы любого типа технических систем, он легко поддаётся проверке. Недостаток данного метода – громоздкость и трудность в составлении универсальной программы для применения вычислительной техники.

Метод состоит в том, что рассматриваются все возможные способы появления отказов, т. е. не отказал ни один элемент, отказал один элемент, отказали два элемента и так далее до отказа всех элементов.

При рассмотрении системы, изображённой на рис. 4.5, предполагается, что в данном случае элементы системы имеют следующие вероятности безотказной работы:

$$P(A) = 0,9; \quad P(B) = 0,8; \quad P(C) = 0,6; \quad P(D) = 0,7.$$

Событие A определяется как событие, состоящее в том, что элемент A работает безотказно, тогда \bar{A} – событие, состоящее в том, что элемент A отказал. Аналогично определяются события для всех остальных элементов. Затем вычисляется вероятность состояния системы для каждого способа появления отказа. Результаты всех вычислений записываются в таблицу состояний.

Первая строка таблицы заполняется следующим образом: вначале предполагается, что в системе не отказал ни один элемент, $A \cap B \cap C \cap D$, вероятность этого вычисляется по формуле

$$P^{(0)} = P(A)P(B)P(C)P(D) = 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,7 = 0,3024.$$

В графе «Отметка о работоспособности» ставится знак «+», если система работоспособна, и знак «–», если неработоспособна.

Вторая строка таблицы предполагает, что в системе отказал один элемент (элемент A), $\bar{A} \cap B \cap C \cap D$, вероятность такого состояния системы

$$P^{(1)} = P(\bar{A})P(B)P(C)P(D) = 0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,6 = 0,0336 \text{ при } P(A) = 1 - P(\bar{A}),$$

где $P(\bar{A})$ и $P(A)$ – вероятности отказа и безотказной работы элемента A .

Остальные строки таблицы заполняются аналогично с учетом отказа одного, двух, трёх и четырёх элементов системы.

Таблица состояний

Номер состояния	Число отказавших элементов	События, характеризующие состояние системы	Вероятность состояния системы	Отметка о работоспособности системы, изображённой на рис. 4.5
1	0	$A \cap B \cap C \cap D$	0,3024	+
2	1	$\bar{A} \cap B \cap C \cap D$	0,0336	+
3	1	$A \cap \bar{B} \cap C \cap D$	0,0756	+
4	1	$A \cap B \cap \bar{C} \cap D$	0,1295	+
5	1	$A \cap B \cap C \cap \bar{D}$	0,2016	+
6	2	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap C \cap D$	0,0084	–
7	2	$\bar{A} \cap B \cap \bar{C} \cap D$	0,0144	+
8	2	$\bar{A} \cap B \cap C \cap \bar{D}$	0,0224	–
9	2	$A \cap \bar{B} \cap \bar{C} \cap D$	0,0324	+
10	2	$A \cap \bar{B} \cap C \cap \bar{D}$	0,0504	+
11	2	$A \cap B \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0864	–
12	3	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap \bar{C} \cap D$	0,0036	–
13	3	$\bar{A} \cap B \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0096	–
14	3	$A \cap \bar{B} \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0056	–
15	3	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap C \cap \bar{D}$	0,0216	–
16	4	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap \bar{C} \cap \bar{D}$	0,0024	–
		Σ	1,0000	0,8400

Таким образом, система со сложным соединением элементов (подсистем) имеет вероятность безотказной работы 0,84.

Оценивая устойчивость функционирования технической системы, необходимо оценить ее поведение в будущем. Если бы системы и объекты были абсолютно безотказными, то большинство проблем, связанных с безопасностью, не возникло бы. Как известно, основная аксиома безопасности гласит: невозможно обеспечить абсолютную безопасность. Все объекты, изделия и системы обладают отличной от нуля вероятностью отказа, поэтому необходимо знать наработку, в течение которой их вероятность отказа достаточно мала, чтобы свести к минимуму вероятность аварий, вызванных отказами техники. Справедливости ради заметим, что при современном уровне развития техники и технологий самым ненадёжным элементом систем «человек – машина – окружающая среда» стал человек. Наиболее часто аварии и катастрофы вызываются воздействием человеческого фактора. Чем меньше будет участвовать человек в работе технических систем, тем надёжнее их работа.

4.5. Расчёт структурной надёжности систем

Показатели надёжности ТС рассчитываются на основании предположения, что система и любой её элемент могут находиться только в одном из двух возможных состояний – работоспособном и неработоспособном, и отказы элементов независимы. Состояние системы (работоспособное или неработоспособное) определяется состоянием элементов и их сочетанием. Поэтому теоретически возможно свести расчет безотказности любой ТС к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы.

Такой метод (метод прямого перебора – см. п. 4.4) практически универсален и может использоваться при расчете любых ТС. Однако при большом количестве элементов системы n данный путь становит-

ся нереальным из-за большого объема вычислений (например, при $n = 10$ число возможных состояний системы составляет $2^n = 1024$, при $n = 20$ превышает 10^6 , при $n = 30$ – более 10^9). Поэтому на практике используют более эффективные и экономичные методы расчета, не связанные с большим объемом вычислений. Возможность применения таких методов связана со структурой ТС.

Контрольные вопросы и задачи

1. В чем состоит условие безотказной работы технических систем с последовательным соединением элементов?

2. Как можно повысить вероятность безотказной работы технической системы с последовательным соединением элементов?

3. Техническая система состоит только из последовательно соединенных 10 элементов первого типа, 15 элементов второго типа, 32 элементов третьего типа и 8 элементов четвертого типа. Интенсивности отказов элементов известны и равны: $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_3 = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_4 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Определить среднюю наработку до отказа $T_{0с}$ и вероятность безотказной работы системы при наработках $t_1 = 100$ и $t_2 = 1000$ ч.

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

4. В чем состоит условие безотказной работы технических систем с параллельным соединением элементов?

5. Как определить вероятность безотказной работы технической системы с параллельным соединением элементов?

6. Как можно повысить надёжность технической системы с параллельным соединением элементов?

7. Как определить вероятность безотказной работы технической системы со сложным соединением элементов?

Глава 5. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для повышения надежности технических систем можно пойти по одному из трех путей (или применить различные их комбинации):

- а) применить резервирование недостаточно надежных подсистем и элементов для повышения надежности всей ТС;
- б) повысить надежность элементов, из которых состоит ТС;
- в) разработать всю техническую систему или её наименее надежную часть заново с использованием других принципов функционирования.

5.1. Резервирование

Наиболее простой прием повышения надежности системы в целом – повышение надежности элементов, входящих в состав технической системы, без внесения в ТС структурных изменений. Всегда можно теоретически рассчитать характеристики элементов системы, при которых вероятность безотказной работы ТС удовлетворяла бы заданным требованиям. Однако практическая реализация такой надежности элементов ТС не всегда возможна или экономически нецелесообразна.

Задачу повышения надежности всей ТС всегда можно решить при помощи резервирования. Обычно резервирование применяется в системах, для которых не удается достичь требуемого уровня надежности повышением безотказности составляющих ее элементов.

Термин *«резервирование»* означает применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов. При резервировании в состав ТС вводятся избыточные элементы, включающиеся в работу при отказе основных. Резервирование осуществляет принцип избыточности.

Избыточность – дополнительные средства и (или) возможности, приданные объекту сверх наименьшего числа необходимых для выполнения объектом заданных функций. Избыточность обеспечивает нормальное функционирование объекта после возникновения отказов его элементов.

Работоспособность систем без резервирования требует высокой надежности всех элементов системы. В сложных технических устройствах без резервирования практически никогда не удается достичь высокой надежности, даже если использовать составляющие элементы с высокими показателями надежности.

Пример. Однажды американский бомбардировщик В-52 в силу ряда обстоятельств был вынужден сбросить термоядерную бомбу, находившуюся у него на борту, на территорию достаточно многонаселенного штата Южная Каролина. Для того чтобы бомба при аварийном сбросе не взорвалась, на нее установили шесть предохранителей. Когда бомба была найдена, оказалось, что из шести предохранителей пять были неисправны и не сработали. Катастрофа не произошла благодаря шестому исправному предохранителю.

В системах с резервированием работоспособность обеспечивается до тех пор, пока для замены отказавших основных элементов имеются в наличии резервные.

Различают следующие методы резервирования:

1. *По виду резервирования:* структурное, временное, информационное, функциональное, нагрузочное.

При *структурном* резервировании в объект с наименьшим достаточным для выполнения требуемых функций количеством элементов вводятся дополнительные элементы. *Основным* считается элемент, необходимый для выполнения требуемых функций объектом без отказов.

Резервный элемент функционально заменяет основной в случае его отказа. В ряде условий и режимов работы основной элемент может быть резервным.

Резервируемый элемент – основной, для замены которого предназначается *резервный* элемент.

Временное резервирование подразумевает использование запасов времени. Объекту для выполнения заданных функций изначально отводится заведомо больше времени, чем необходимо. Резервы времени создаются, например, за счет интенсификации работы объекта.

Информационное резервирование обеспечивается избытком информации.

В каналах связи для этого одно и то же сообщение передается многократно, используются избыточные символы для отображения передаваемой информации и так далее с целью уменьшения или устранения искажений.

Функциональное резервирование осуществляется при выполнении заданных функций разными способами и техническими средствами (например, одновременное использование различных средств связи в системах управления). Оценку надежности в таких случаях ведут не по *наработке на отказ*, а по *коэффициенту готовности*.

Нагрузочное резервирование – применение нагрузочных резервов с целью обеспечения оптимальной нагрузочной способности элементов.

2. *По способу соединения элементов системы*: общее, раздельное, смешанное.

Если резервирование применено к системе в целом, то оно называется *общим*, если к одному или нескольким элементам – *раздельным*.

Смешанное резервирование применяют при сочетании нескольких разных видов резервирования в одном объекте.

3. *По способу включения резервных элементов*: постоянное, динамическое, в том числе резервирование замещением, скользящее, мажоритарное.

Постоянное резервирование производится без изменения структуры объекта при возникновении отказа его элемента. Резервный элемент включается в работу без дополнительных переключающих устройств, на переключение время не расходуется.

Динамическое резервирование выполняется посредством изменения структуры объекта и, в свою очередь, подразделяется на несколько разновидностей:

– резервирование *замещением*, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного;

– *скользящее* резервирование, при котором несколько основных элементов резервируются одним или несколькими резервными, каждый из которых может заменить любой основной;

– *мажоритарное* резервирование, при котором используется «голосование», т. е. дополнительный (мажоритарный) логический элемент сравнивает сигналы, поступающие от элементов с одинаковыми функциями. При совпадении результатов сигналы передаются на выход.

4. *По кратности резервирования*: с целой кратностью, дробной кратностью.

Важной характеристикой структурного резервирования является *кратность* резервирования – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов, выраженное несокращаемой дробью (типа 2 : 3; 4 : 2 и т. д.).

Резервирование с целой кратностью выполняется при резервировании одного основного элемента одним или несколькими резервными элементами. Резервирование одного основного элемента одним резервным (т. е. с кратностью 1 : 1) называется *дублированием*.

Резервирование с дробной кратностью – при резервировании двух (или более) однотипных элементов одним (или более) резервным элементом.

5. *По режиму работы резерва*: нагруженный, облегченный, ненагруженный:

– *нагруженное* резервирование, при котором резервные элементы (или один из них) находятся в режиме основного элемента;

– *облегченное* резервирование, действительное в случаях, когда резервные элементы (по крайней мере один из них) находятся в менее нагруженном режиме по сравнению с основными;

– *ненагруженное* резервирование, при котором резервные элементы до начала выполнения ими функций находятся в ненагруженном режиме.

6. *По возможности восстановления*: с восстановлением, без восстановления.

Если работоспособность резервных элементов восстанавливается при эксплуатации, то применяется резервирование *с восстановлением*, в остальных случаях используется резервирование *без восстановления*.

Схемы различных способов резервирования показаны на рис. 5.1.

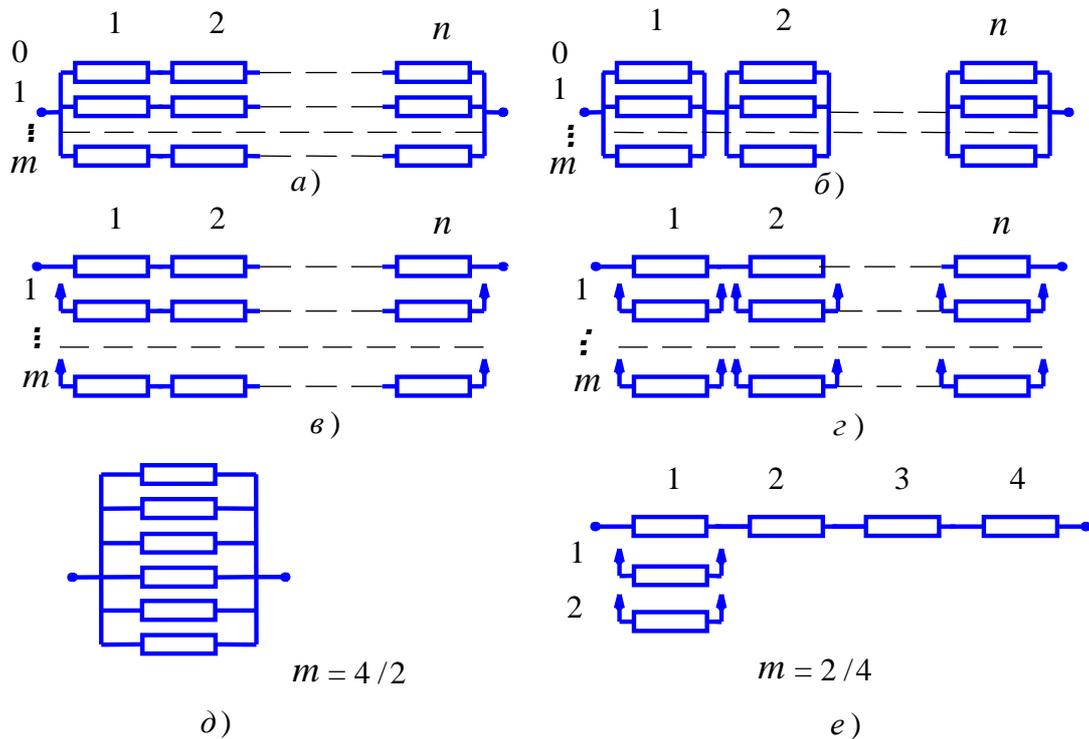


Рис. 5.1. Схемные обозначения различных способов резервирования:
 а – общее постоянное с целой кратностью; б – раздельное постоянное с целой кратностью; в – общее замещением с целой кратностью; г – раздельное замещением с целой кратностью; д – общее постоянное с дробной кратностью; е – раздельное замещением с дробной кратностью

5.2. Кратность резервирования и основные расчетные формулы

Кратность резервирования – основной параметр резервирования, определяемый как m/n – отношение числа резервных элементов к числу основных (резервируемых).

Как указано ранее (п. 5.1), различают резервирование с целой и дробной кратностью. При резервировании с целой кратностью величина m рассматривается как целое число, при резервировании с дробной кратностью величина m представляется в виде несокращаемой дроби. Например, $m = 4/2$ означает, что имеется резервирование с дробной кратностью, при котором число резервных элементов равно четырем, число основных – двум, а их общее число равно шести.

По способу включения различают *постоянное резервирование* или *резервирование замещением*.

При *постоянном* резервировании резервные элементы подключены к основным в течение всего времени работы и работают в одинаковом с ними режиме.

При *резервировании замещением* резервные элементы замещают основные после их отказа. Резервные элементы до момента включения в работу могут находиться в трех состояниях резерва:

- нагруженном;
- облегченном;
- ненагруженном резерве.

Для известных методов резервирования используют следующие расчётные формулы.

1. Для *общего резервирования с постоянно включенным (нагруженным) резервом и целой кратностью* (см. рис. 5.1, а):

$$P_c(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) \right]^{m+1}, \quad (5.1)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента за время t ; n – число элементов основной или любой резервной цепи.

Кратность резервирования m/n – отношение числа резервных элементов к числу основных. Дробь не сокращается.

При экспоненциальном законе распределения, когда

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i t},$$

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda_c t}]^{m+1}, \quad (5.2)$$

$$T_{\text{ср.с}} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_{\text{ср.0}} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1}, \quad (5.3)$$

где $\lambda_0 = \sum_{i=1}^m \lambda_i$ – интенсивность отказов нерезервированной системы или любой из m резервных систем;

$T_{\text{ср.0}}$ – среднее время безотказной работы нерезервированной системы или любой из m резервных систем.

При резервировании элементов неодинаковой степени надежности

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^m q_i(t) = 1 - \prod_{i=0}^m [1 - p_i(t)], \quad (5.4)$$

где $q_i(t)$, $p_i(t)$ – вероятность отказов и вероятность безотказной работы в течение времени t i -го изделия соответственно.

2. *Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом и целой кратностью* (см. рис. 6.1, б):

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \{1 - [1 - p_i(t)]^{m_i+1}\}, \quad (5.5)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента;
 m_i – кратность резервирования i -го элемента;
 n – число элементов основной системы.

При экспоненциальном законе надежности, когда $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$,

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \{1 - [1 - e^{-\lambda_i t}]^{m_i+1}\}. \quad (5.6)$$

Для элементов одинаковой степени надежности и одинаковой кратности их резервирования

$$P_c(t) = \{1 - [1 - e^{-\lambda_c t}]^{m+1}\}, \quad (5.7)$$

$$T_{\text{ср.с}} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{i=0}^m \frac{1}{v_i(v_i+1) \dots (v_i+n-1)}, \quad (5.8)$$

где $v_i = (i+1)/(m+1)$.

3. *Общее резервирование замещением с целой кратностью* (см. рис. 5.1, в):

$$P_{m+1}(t) = P_m(t) + \int_0^t P(t-\tau) a_m(\tau) d\tau \quad (5.9)$$

где $P_{m+1}(t)$, $P_m(t)$ – вероятности безотказной работы резервированной системы кратности $m+1$ и m соответственно;
 $P(t-\tau)$ – вероятность безотказной работы основной системы в течение времени $(t-\tau)$;
 $a_m(\tau)$ – частота отказов резервированной системы кратности m в момент времени τ .

Формула (5.8) позволяет получить расчетные соотношения для устройств любой кратности резервирования. Для получения таких формул необходимо выполнить интегрирование в правой части, подставив вместо $P(t-\tau)$ и $a_m(\tau)$ их значения в соответствии с выбранным законом распределения и состоянием резерва.

При экспоненциальном законе надежности и ненагруженном состоянии резерва

$$P_a(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}, \quad (5.10)$$

$$T_{\text{ср.с}} = T_{\text{ср.0}}(m + 1), \quad (5.11)$$

где λ_0 , $T_{\text{ср.0}}$ – интенсивность отказов и средняя наработка до первого отказа основного (нерезервированного) устройства.

При экспоненциальном законе и недогруженном состоянии резерва

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_i t})^i \right], \quad (5.12)$$

$$T_{\text{ср.с}} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1 + ik}, \quad (5.13)$$

где $a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)$; $k = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}$; λ_1 – интенсивность отказов резервного устройства до замещения.

При нагруженном состоянии резерва формулы для $P_c(t)$ и $T_{\text{ср.с}}$ совпадают с (5.2).

4. *Раздельное резервирование замещением с целой кратностью* (см. рис. 5.1, з):

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (5.14)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы системы из-за отказов элементов i -го типа, резервированных по способу замещения. Вычисляется $p_i(t)$ по формулам общего резервирования замещением (формулы (5.9), (5.10), (5.12)).

5. *Общее резервирование с дробной кратностью и постоянно включенным резервом* (см. рис. 5.1, д):

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_i^l p^{l-i}(t) \sum_{j=0}^i (-1)^j C_1^j p_0^j(t), \quad (5.15)$$

$$T_{\text{ср.с}} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{l-h} \frac{1}{h + i}, \quad (5.16)$$

где $p_0(t)$ – вероятность безотказной работы основного или любого резервного элемента;

l – общее число основных и резервных систем;

h – число систем, необходимых для нормальной работы резервированной системы.

В данном случае кратность резервирования

$$m = (l - h)/h. \quad (5.17)$$

Приведенные выше формулы (кроме (5.9), (5.12), (5.13)) могут быть использованы только в тех случаях, когда справедливо допущение об отсутствии последствий отказов.

Последствия отказов проявляются практически всегда при постоянном включении резерва, а также в случае резервирования замещением при недогруженном состоянии резерва.

Выражение (5.9) является основным при получении расчетных формул в случае учета влияния последствия отказов. При этом члены $p(t - \tau)$ и $a_m(\tau)$ должны быть записаны с учетом последствий отказов, вида резервирования и его кратности.

В ряде случаев элементы резервированных устройств могут иметь два вида отказов – «обрыв» и «короткое замыкание». В этом случае вычислять вероятность безотказной работы следует, суммируя вероятности всех благоприятных (не приводящих к отказу) гипотез, т. е.

$$P_c(t) = \sum_{j=1}^k p_j(t), \quad (5.18)$$

где $p_j(t)$ – вероятность j -й благоприятной гипотезы, вычисленной с учетом двух видов отказов; k – число благоприятных гипотез.

При вычислениях $p_j(t)$ следует иметь в виду, что для элементов сложной системы справедливы выражения

$$p(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right], \quad \varphi_0 + \varphi_3 = 1, \quad (5.19)$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов элемента; φ_0 , φ_3 – вероятность возникновения «обрыва» и «короткого замыкания» соответственно.

При экспоненциальном законе распределения

$$p(t) = e^{-\lambda t}, \quad \varphi_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_0 + \lambda_3}, \quad \varphi_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_3}, \quad (5.20)$$

где λ_0 , λ_3 – интенсивность отказов элемента по «обрыву» и «короткому замыканию» соответственно.

Остальные количественные характеристики надежности в случае необходимости вычисляются с помощью $P_c(t)$ по известным аналитическим зависимостям, приведенным в гл. 1.

Расчет надежности резервированных систем иногда полезно выполнять при помощи схемы «гибели» («чистого размножения»). В соответствии с этой схемой преобразование Лапласа вероятности возникновения n отказов вычисляется по формуле

$$P_n(s) = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(s+\lambda_0)(s+\lambda_1) \dots (s+\lambda_n)}. \quad (5.21)$$

При неравных корнях знаменателя обратное преобразование Лапласа $P_n(s)$ будет

$$P_n(s) = \lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1} \sum_{k=0}^n \frac{e^{s_k t}}{B'(s_k)}. \quad (5.22)$$

В формулах (5.21) и (5.22) приняты обозначения: λ_0 – интенсивность отказов системы до выхода из строя первого элемента; λ_1 – интенсивность отказов системы в промежутке времени от момента отказа первого элемента до второго; λ_2 – интенсивность отказов системы в промежутке времени от момента отказа второго элемента до третьего и т. д.; n – число отказавших элементов; $s_k = -\lambda_k$ – k -й корень знаменателя выражения (5.22); $B'(s_k)$ – производная знаменателя в точке s_k .

При одинаковых опасностях отказов λ_i , т. е. $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$, расчетные формулы имеют вид

$$P_n(t) = \frac{\lambda_0^n}{(s+\lambda_0)^{n+1}}, \quad (5.23)$$

$$P_n(t) = \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} e^{-\lambda_0 t}. \quad (5.24)$$

При расчетах надежности по формулам (5.23, 5.24) следует помнить, что они не определяют вероятности безотказной работы (или вероятности отказа) резервированной системы, а определяют лишь вероятность i -го состояния системы, т. е. вероятность того, что в системе откажут n элементов. Для вычисления вероятности безотказной работы следует находить вероятности 0, 1, ..., n отказов, когда система еще находится в работоспособном состоянии (исправна), и суммировать полученные вероятности.

Среднее время безотказной работы системы при использовании схемы «гибели» вычисляется по формуле

$$T_{\text{ср.с}} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\lambda_i}, \quad (5.25)$$

где λ_i – интенсивность отказов системы до выхода из строя i -го элемента.

При схемной реализации резервирования в ряде случаев конкретные технические решения не приводятся к логическим схемам расчёта надёжности. В таких случаях для получения аналитических выражений для количественных характеристик надёжности необходимо использовать метод перебора благоприятных гипотез. Вероятность безотказной работы при этом вычисляется по выражению (5.19).

При анализе надёжности резервированных устройств на этапе проектирования приходится сравнивать различные схемные решения. В этом случае за критерий качества резервирования принимается выигрыш надёжности.

Выигрышем надёжности называется отношение количественной характеристики надёжности резервированного устройства к той же количественной характеристике нерезервированного устройства или устройства с другим видом резервирования.

Наиболее часто используются следующие критерии качества резервированных устройств: $G_0(t)i$ – выигрыш надёжности в течение времени t по вероятности отказов; $G_0(t)$ – выигрыш надёжности в течение времени t по вероятности безотказной работы; G_T – выигрыш надёжности по среднему времени безотказной работы.

При резервировании элементов электроники (резисторов, конденсаторов, контактов реле, диодов и т. п.) всегда произведение интенсивности отказов элемента и времени его работы значительно меньше единицы, т. е. $\lambda t < 1$, поэтому при вычислении $G_q(t)$ и $G_q(p)$ целесообразно функции вида $e^{-k\lambda t}$ (экспоненциальный случай) разложить в ряд

$$e^{-k\lambda t} = 1 - k\lambda t + \frac{k^2 \lambda^2 t^2}{2!} \text{ (при небольшом } k). \quad (5.26)$$

Если система исправна при отказе m элементов, то необходимо брать не менее чем $m + 2$ членов разложения.

Пример. Дана система, схема расчета надежности которой изображена на рис. 5.2. Необходимо найти вероятность безотказной работы системы при известных вероятностях безотказной работы ее элементов (значения вероятностей указаны на рисунке).

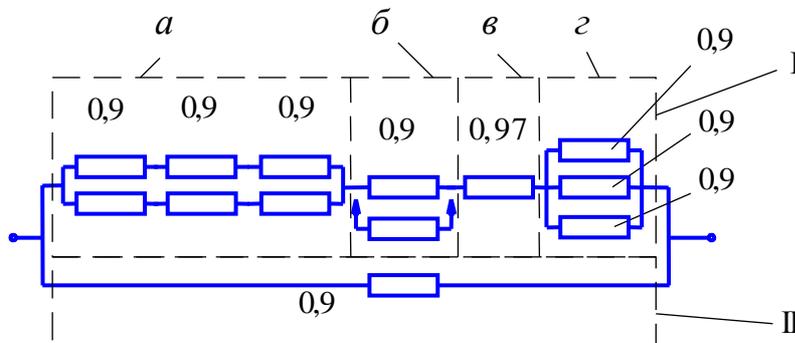


Рис. 5.2. Схема расчета надежности

Решение. На рис. 5.2 видно, что система состоит из двух (I и II) устройств с разной степенью надежности.

Устройство I состоит из четырех узлов: *a* – дублированного узла с постоянно включенным резервом, причем каждая часть узла состоит из трех последовательно соединенных (в смысле надежности) элементов расчета; *б* – дублированного узла по способу замещения; *в* – узла с одним нерезервированным элементом; *г* – резервированного узла с кратностью $m = 1/2$ (схема группирования).

Устройство II представляет собой нерезервированное устройство, надежность которого известна.

Так как оба устройства неравнонадежны, то на основании формулы (5.2) имеем

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - p_i(t)] = 1 - [1 - p_I(t)][1 - p_{II}(t)].$$

Определяется вероятность $p_I(t)$. Вероятность безотказной работы устройства I равна произведению вероятностей безотказной работы всех узлов, т. е.

$$p_I(t) = p_a p_b p_v p_g.$$

В узле a число элементов основной и резервной цепи $n = 3$, а кратность резервирования $m = 1$. Тогда на основании формулы (5.1)

$$p_a = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^3 p_i(t) \right]^2 = 1 - [1 - 0,9^3]^2 \approx 0,93.$$

В узле b кратность общего резервирования замещением $m = 1$, тогда на основании формулы (5.10) получается

$$p_b(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 t} (1 + \lambda_0) \approx 0,9(1 + 0,1) = 0,99.$$

В узле z применено резервирование с дробной кратностью, когда общее число основных и резервных систем $l = 3$, число систем, необходимых для нормальной работы, $h = 2$.

Тогда на основании формулы (5.14) вероятность безотказной работы устройства I будет

$$p_x = p_a p_b p_z = 0,93 \cdot 0,99 \cdot 0,97 \cdot 0,972 \approx 0,868,$$

а вероятность безотказной работы резервированной системы будет

$$P_0 = 1 - (1 - p_1) (1 - p_2) - 1 - (1 - 0,868) (1 - 0,9) = 0,987.$$

Количественно повышение надежности системы в результате резервирования или применения высоконадежных элементов можно оценить по коэффициенту выигрыша надежности, определяемому как отношение показателя надежности до и после преобразования системы. Например, для системы из n последовательно соединенных элементов после резервирования одного из элементов (k -го) аналогичным по надежности элементом коэффициент выигрыша надежности по вероятности безотказной работы составит

$$G_p = \frac{P'}{P} = \frac{p_1 p_2 \dots p_{k-1} [1 - (1 - p_k)^2] p_{k+1} \dots p_n}{p_1 p_2 \dots p_{k-1} p_k p_{k+1} \dots p_n} = \frac{1 - (1 - p_k)^2}{p_k} = 2 - p_k, \quad (5.27)$$

где P' – вероятность безотказной работы резервированной системы; P – вероятность безотказной работы нерезервированной системы.

Из формулы (5.27) следует, что эффективность резервирования (или другого приема повышения надежности) тем больше, чем меньше надежность резервируемого элемента (если $p_k = 0,9$, то $G_p = 1,1$; если $p_k = 0,5$, то $G_p = 1,5$).

Следовательно, при структурном резервировании наибольшего эффекта можно добиться при резервировании самых ненадежных элементов (или групп элементов).

В общем случае при выборе элемента (или группы элементов) для повышения надежности или резервирования необходимо исходить из условия обеспечения при этом наилучшего результата.

5.3. Особенности расчета надежности систем с нагруженным и ненагруженным резервированием

Расчёт систем с нагруженным резервированием осуществляется по формулам последовательного и параллельного соединения элементов аналогично расчету комбинированных систем. При нагруженном резервировании различие между основными и резервными элементами только в названии, резервные элементы постоянно работают в том же режиме, что и основные, независимо от состояния основных элементов. Поэтому надёжность резервных элементов не зависит от момента их перехода из резервного состояния в основное и равна надежности основных элементов.

При нагруженном резервировании резервные элементы расходуют свой ресурс, имеют одинаковое распределение наработок до отказа и интенсивность отказов основных λ_0 и резервных λ_p элементов одинаковая ($\lambda_0 = \lambda_p$).

Для обеспечения нормальной работы (сохранения работоспособности) необходимо, чтобы количество работоспособных элементов не становилось меньше минимально необходимого.

Пусть n – число однотипных элементов в системе; r – число элементов, необходимых для функционирования системы.

Кратность резервирования – соотношение между общим числом однотипных элементов и элементов, необходимых для работы системы, $k = (n - r)/r$.

Кратность резервирования может быть целой, если $r = 1$ или дробной, если $r > 1$.

Для системы с последовательным соединением n элементов (см. рис. 5.1) при общем резервировании с кратностью k (рис. 5.3, а):

$$P_{об} = 1 - (1 - p)^{k+1} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i\right)^{k+1}. \quad (5.28)$$

Приведенная формула (5.28) идентична формуле (5.1).

В частности, при дублировании ($k = 1$):

$$P_{об} = 1 - (1 - P)^2 = P(2 - P). \quad (5.29)$$

При раздельном резервировании (рис. 5.3, б):

$$P_{раз} = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)]^{k+l}, \quad (5.30)$$

а при раздельном дублировании ($k = 1$):

$$P_{раз} = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)^2] = \prod_{i=1}^n p_i(2 - p_i) = \prod_{i=1}^n (2 - p_i). \quad (5.31)$$

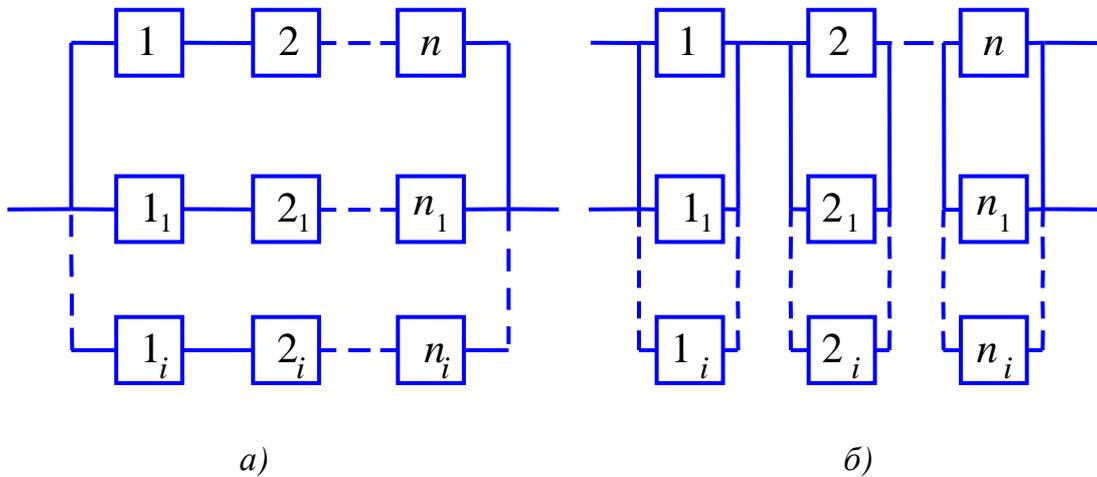


Рис. 5.3. Общее (а) и раздельное (б) нагруженные резервирования

Тогда коэффициенты выигрыша надежности по вероятности безотказной работы при дублировании запишем в виде

$$G_{об} = \frac{P_{об}}{P} = 2 - P, \quad G_{раз} = \frac{P_{раз}}{P} = \prod_{i=1}^n (2 - p_i), \quad (5.32)$$

откуда следует, что раздельное резервирование эффективнее общего (например, для системы из трех одинаковых элементов при $P = 0,9$ $G_{об} = 1,27$, $G = 1,33$).

При ненагруженном резервировании резервные элементы последовательно включаются в работу при отказе основного, затем первого резервного и т. д. (рис. 5.4, 5.5), поэтому надежность резервных элементов зависит от момента их перехода в основное состояние. При ненагруженном резервировании резервные элементы не подвергаются нагрузке, их показатели надежности не изменяются и они не могут отказать за время нахождения в резерве, т. е. интенсивность отказов резервных элементов $\lambda_p = 0$.

Такое резервирование в различных ТС встречается наиболее часто, так как, по сути, оно аналогично замене отказавших элементов и узлов на запасные.

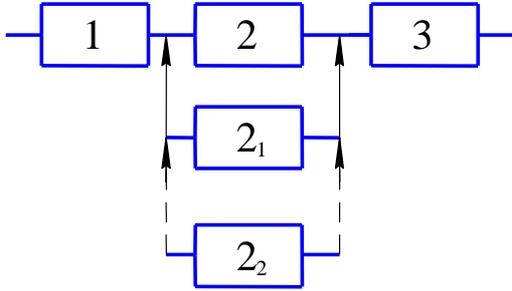


Рис. 5.4. Ненагруженное резервирование

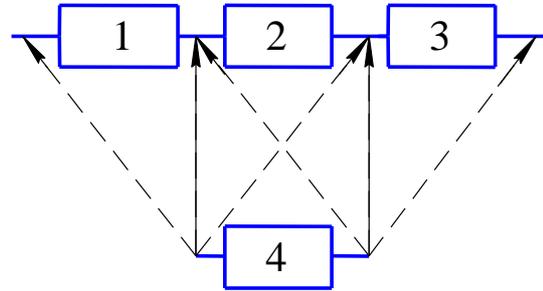


Рис. 5.5. Скользящее резервирование

Если резервные элементы до их включения обладают высокой степенью надежности, то для системы с ненагруженным резервированием кратности k (всего количество элементов $k + 1$):

$$Q = \frac{1}{(k+1)!} \prod_{i=1}^{k+1} q_i; \quad P = 1 - \frac{1}{(k+1)!} \prod_{i=1}^{k+1} (1 - p_i), \quad (5.33)$$

т. е. вероятность отказа в $(k + 1)!$ раз меньше, чем при нагруженном (параллельном соединении, см. формулу (5.33)).

Для идентичных (одинаковых) по надежности основного и резервного элементов

$$P = 1 - \frac{1}{(k+1)!} (1 - p)^{k+1}. \quad (5.34)$$

При экспоненциальном распределении наработки (простейшем потоке отказов) в случае $\lambda t \ll 1$ можно воспользоваться приближенной формулой

$$P \approx 1 - \frac{(\lambda)^{k+1}}{(k+1)!}. \quad (5.35)$$

При ненагруженном резервировании средняя наработка на отказ

$$T = \sum_{i=1}^{k+1} T_{0i}, \quad (5.36)$$

а для идентичных элементов $T_0 = nT_{0i}$.

Примеры ненагруженного резервирования представлены на рис. 5.6.

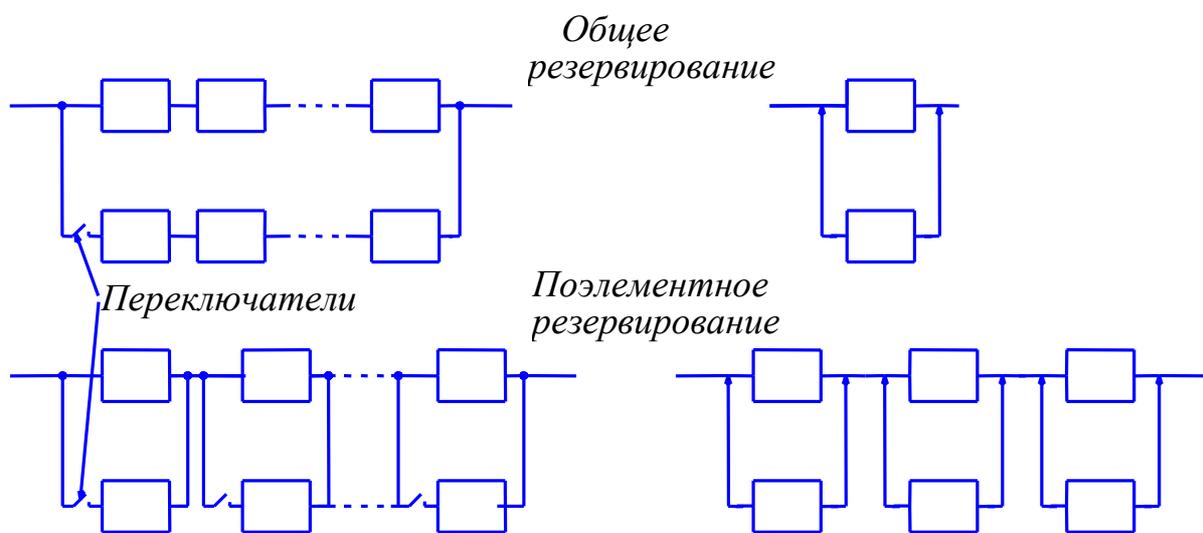


Рис. 5.6. Ненагруженное резервирование

Резервные элементы включаются в работу только после отказа основных. Переключение производится вручную или автоматически.

Если рассмотреть два характерных вида резервирования (рис. 5.7), то очевидно, что при равенстве числа основных и резервных элементов ненагруженный резерв обеспечивает большую надежность. Но это справедливо только тогда, когда перевод резервного элемента в работу происходит абсолютно надежно. Выполнение этого условия связано со значительными техническими трудностями или является иногда нецелесообразным по экономическим или техническим причинам.

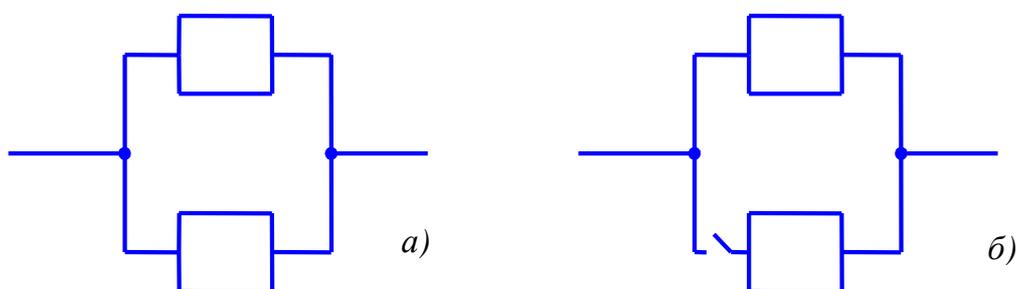


Рис. 5.7. Нагруженное (а) и ненагруженное (б) резервирования

Облегченное резервирование используется при большой инерционности переходных процессов, происходящих в элементе при его переходе из резервного в основной режим, и нецелесообразности применения нагруженного резервирования из-за недостаточного выигрыша в надежности.

Очевидно, облегченный резерв занимает промежуточное положение между нагруженным и ненагруженным. Интенсивность отказов резервных элементов λ_p ниже, чем у основных λ_0 , т. е. $\lambda_0 > \lambda_p$.

Точные выражения для расчета надежности систем при облегченном резервировании громоздки и неоднозначны, однако при экспоненциальном распределении наработки справедлива приближенная формула

$$P = \frac{1}{(k+1)!} \lambda(\lambda + \lambda_0)(\lambda + 2\lambda_0) \dots [\lambda k \lambda_0] t^{k+1} = \frac{t^{k+1}}{(k+1)!} \prod_{i=0}^k (\lambda + i\lambda_0), \quad (5.37)$$

где λ_0 – интенсивность отказов элементов в облегченном режиме; k – кратность резервирования.

Разновидностью ненагруженного резервирования является скользящее резервирование, когда один и тот же резервный элемент может быть использован для замены любого из элементов основной системы.

Скользящее резервирование используется для резервирования нескольких одинаковых элементов системы одним или несколькими одинаковыми резервными (см. рис. 5.5, здесь все элементы идентичны, а элемент 4 – избыточный). Очевидно, отказ системы произойдет, если из общего количества идентичных элементов (основных и резервных) число отказавших превышает число резервных. Поэтому скользящее резервирование считается активным с дробной кратностью. Расчет вероятности безотказной работы систем со скользящим резервированием аналогичен расчету систем типа « m из n ».

Пример. Определить безотказность системы, состоящей из двух последовательно соединенных элементов и с одним резервным. Эле-

менты системы взаимозаменяемы. Вероятность безотказной работы элементов известна: $P(A) = 0,9$; $P(B) = 0,8$; $P(R) = 0,95$. Схема изображена на рис. 5.8.

Решение. Вероятность безотказной работы системы без резерва

$$P = P(A) P(B) = 0,9 \cdot 0,8 = 0,72 .$$

Для определения вероятности безотказности системы необходимо рассмотреть все возможные состояния системы, определить вероятность каждого состояния системы, затем значения вероятностей, при которых система работоспособна, сложить их, это и будет вероятность безотказной работы системы. Вычисления записываются в таблицу. Таким образом, вероятность безотказной работы системы, состоящей из двух последовательно соединенных элементов и с одним резервным, равна 0,967.

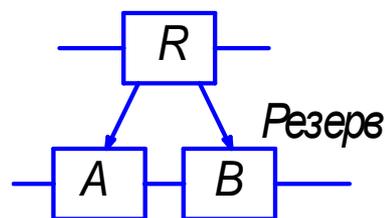


Рис. 5.8. Схема для определения безотказной работы системы с резервным элементом

Значения вероятностей состояния системы

№ п/п	Состояние системы	Вероятность	Отметка о работоспособном состоянии
1	$A \cap B \cap R$	$0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 0,684$	+
2	$\bar{A} \cap B \cap R$	$0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 0,076$	+
3	$A \cap \bar{B} \cap R$	$0,9 \cdot 0,2 \cdot 0,95 = 0,171$	+
4	$A \cap B \cap \bar{R}$	$0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,05 = 0,36$	+
5	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap R$	$0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,95 = 0,019$	-
6	$\bar{A} \cap B \cap \bar{R}$	$0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,05 = 0,004$	-
7	$A \cap \bar{B} \cap \bar{R}$	$0,9 \cdot 0,2 \cdot 0,05 = 0,009$	-
8	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap \bar{R}$	$0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,05 = 0,001$	-
		$\Sigma = 1,00$	0,967

Данным методом можно определить вероятность безотказной работы любой технической системы с любым возможным подключением резерва, однако метод требует громоздких вычислений.

Рассмотренный метод оценки безопасности системы можно назвать *индуктивным*. При анализе математической модели вначале вычисляют вероятности состояний системы для всех возможных отказов её элементов, затем определяют влияние отказа каждого элемента или комбинации элементов на работоспособность системы. При таком подходе случайный пропуск неработоспособных состояний системы маловероятен. Однако этот метод очень трудоемок, ведь приходится рассматривать все возможные варианты.

Контрольные вопросы

1. Какие виды резервирования существуют?
2. В чем отличие нагруженного и ненагруженного резервирования?
3. Что такое кратность резервирования и в чем отличие целой и дробной кратности?
4. Что представляет собой ненагруженное резервирование и как случайная наработка до отказа системы связана со случайными наработками составляющих систему элементов?
5. К какому закону распределения стремится наработка до отказа системы при больших значениях кратности резервирования?
6. Как изменяется вероятность безотказной работы системы с увеличением кратности резервирования?
7. При каких условиях ненагруженное резервирование значительно эффективнее нагруженного?
8. Что представляет собой облегченный резерв и видом какого резервирования он является?
9. Как определить вероятность безотказной работы для системы с облегченным резервом?
10. Что представляет собой скользящее резервирование и видом какого резервирования оно является?

Глава 6. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РИСКА

6.1. Понятие риска

Риск – это количественная оценка опасности, которая численно равна вероятности нежелательного с точки зрения безопасности события. Применительно к проблеме безопасности жизнедеятельности таким событием может быть ухудшение здоровья или смерть человека, авария или техногенная катастрофа, опасное природное явление, загрязнение окружающей среды, разрушение экологической системы, гибель группы людей или возрастание смертности населения, увеличение социальной напряженности, материальный ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличения затрат на безопасность.

Под термином «*ущерб*» понимают фактические и вероятные экономические потери и (или) ухудшение состояния природной среды вследствие изменений в окружающей человека среде.

Степень риска представляет собой двухкомпонентную величину, которая характеризуется ущербом от воздействия того или иного опасного фактора и вероятностью возникновения рассматриваемого. Численно степень риска равна произведению вероятности нежелательного с точки зрения безопасности события на ущерб, наносимый этим событием.

Фактор риска – это событие, явление или процесс, который непосредственно не наносит какого-либо вреда, но увеличивает вероятность возникновения неблагоприятного с точки зрения безопасности события.

Аналитически риск выражает частоту реализации опасностей по отношению к возможному их числу. В общем виде

$$R = \frac{N(t)}{Q(f)}, \quad (6.1)$$

где R – риск;

N – количественный показатель количества нежелательных событий в единицу времени t ;

Q – число объектов, подверженных определенному фактору риска f .

Понятие «*риск*» включает в себя еще один аспект – это количественная характеристика действия опасностей, формируемых конкретной деятельностью человека. Например, количество смертельных

случаев, количество случаев заболевания, количество случаев временной и постоянной нетрудоспособности (инвалидности), вызванной действием на человека какого-либо опасного фактора (электрический ток, вредное вещество, двигающийся предмет и др.), соотнесенных с определенным количеством жителей (работников) за конкретный период времени. Значение риска для конкретного опасного фактора можно получить из статистики несчастных случаев, случаев заболевания и так далее за различные промежутки времени: смена, сутки, неделя, квартал, год.

Вероятность возникновения опасности (риск) – величина, существенно меньшая единицы. Кроме того, область возможной реализации опасности распространена в пространстве и времени. В терминах риска принято описывать и опасности от достоверных событий, происходящих с вероятностью, равной единице, например, загрязнение окружающей среды отходами конкретного промышленного предприятия. В этом случае «риск» эквивалентен ущербу и величина риска равна величине ущерба.

Таким образом, количественная оценка риска представляет собой процесс оценки численных значений вероятности и последствий нежелательных процессов, явлений, событий.

Опасности могут реализоваться в форме травм, заболеваний или гибели человека только в том случае, если область формирования опасностей (ноксосфера) пересекается с областью, в которой возможно пребывание человека (гомосфера). В производственных условиях – это источник опасности (один из элементов производственной среды) и рабочая зона (рис. 6.1).

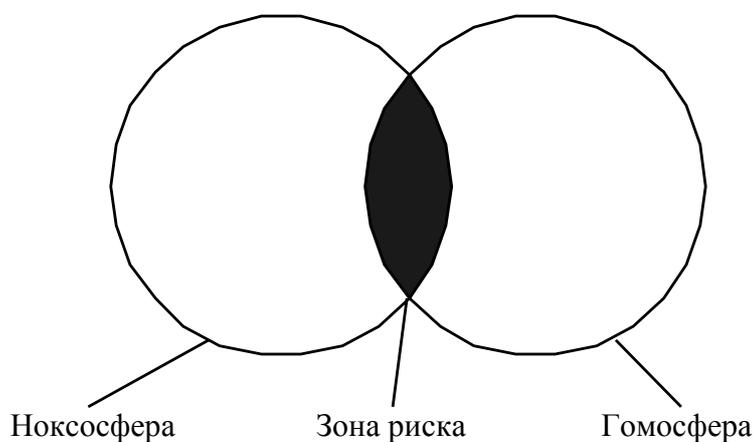


Рис. 6.1. Область действия опасности на человека

Общий риск для людей выражается двумя категориями:

- *индивидуальный риск*, который определяется как вероятность того, что человек испытает определенное воздействие в ходе своей деятельности;

- *социальный риск*, который определяется как соотношение между количеством людей, погибших в одной аварии, и вероятностью этой аварии.

В производственных условиях различают индивидуальный и коллективный риск.

Индивидуальный риск характеризует реализацию опасности определенного вида деятельности для конкретного индивидуума – производственный травматизм и профессиональная заболеваемость, частота несчастных случаев и профессиональных заболеваний.

Коллективный риск – это вероятность травмирования или гибели двух и более человек от воздействия опасных и вредных производственных факторов.

Как известно, основная аксиома безопасности утверждает, что абсолютная безопасность невозможна, т. е. вероятность гибели человека ни при каких условиях не может быть равна нулю. Поэтому наименьшим уровнем риска принято считать приемлемый риск. Современное общество стоит на эгоцентрических позициях, считается, что человеческая жизнь бесценна. Но в реальном мире за всё приходится платить, в том числе и за безопасность. Существует грань, за которой затраты на достижение более высокого уровня безопасности воспринимаются обществом и отдельными людьми как чрезмерные. Так, например, риск гибели человека в дорожно-транспортном происшествии в 2014 г. в Российской Федерации составил $1,85 \cdot 10^{-4}$ (по официальным данным ГИБДД), а в Германии – $5 \cdot 10^{-5}$. Показатели отличаются примерно в 3,7 раза. При этом климатические условия, автомобили, правила дорожного движения и люди в этих странах вполне сопоставимы и не объясняют такого различия. Очевидно, причины нужно искать в организации дорожного движения, а следовательно, в расходах на его безопасность, которые в России и Германии принято считать достаточными.

Приемлемый риск – это вероятность гибели человека, с которой общество на данном этапе своего развития готово примириться и на снижение которой оно не готово тратить дополнительные средства.

Это некий оптимальный уровень, при котором затраты на безопасность и тяжесть последствий от воздействия данного опасного фактора уравниваются друг друга по мнению тех, кто имеет реальную власть в данном конкретном обществе людей.

Использование риска в качестве единого показателя вреда при оценке действия различных опасных и вредных факторов на человека применяется для обоснованного сравнения безопасности различных отраслей экономики и типов работ, аргументации социальных преимуществ и льгот для определенной категории лиц и т. д.

Классификация источников опасности и уровни риска гибели человека от воздействия этих источников опасности представлены в таблице.

Классификация источников опасности и уровней риска смерти человека в промышленно развитых странах
(R – количество смертельных случаев (человек в год))

Источник	Причины	Среднее значение
Внутренняя среда организма человека	Генетические и соматические заболевания, старение	$R_{\text{ср}} = 0,6 \dots 10^{-2}$
Естественная среда обитания	Несчастный случай из-за воздействия стихийных бедствий (землетрясения, ураганы, наводнения и др.)	Общий $R_{\text{ср}} = 10^{-5}$: - наводнения $4 \cdot 10^{-6}$; - землетрясения $3 \cdot 10^{-6}$; - грозы $6 \cdot 10^{-7}$; - ураганы $3 \cdot 10^{-8}$
Техносфера	Несчастные случаи; заболевания, вызванные загрязнением окружающей среды	$R_{\text{ср}} = 10^{-4} \dots 10^{-6}$
Профессиональная деятельность	Профессиональные заболевания, несчастные случаи на производстве (при профессиональной деятельности)	- безопасная $R_{\text{ср}} < 10^{-4}$; - относительно безопасная $R_{\text{ср}} = 10^{-4} - 10^{-3}$; - опасная $R_{\text{ср}} = 10^{-3} - 10^{-2}$; - особо опасная $R_{\text{ср}} > 10^{-2}$
Социальная среда	Самоубийства, самоповреждения, преступные действия, военные действия и т.д.	$R_{\text{ср}} = (0,5 - 1,5) 10^{-4}$

Величина риска – не только оценка безопасности в какой-то одной отрасли промышленности, данный показатель применяется и для оценки изменения уровня безопасности со временем и при различных условиях труда, количественного установления диапазона риска по всей промышленности в целом.

Ожидаемый (прогнозируемый) риск R – это произведение частоты реализации конкретной опасности f на произведение вероятностей нахождения человека в «зоне риска» при различном регламенте технологического процесса:

$$R = f \prod_i^n p_i, \quad (6.2)$$

где f – число несчастных случаев (смертельных исходов) от данной опасности чел./год (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» для каждого i -го фактора.

Использование формулы (6.2) для оценки вероятности производственного риска удобно тем, что позволяет определять величины рисков воздействия различных негативных факторов для конкретного технологического процесса производства, проводить оценку значимости каждого фактора с позиции безопасности.

6.2. Классификация видов риска

В зависимости от факторов риска и объектов риска различают индивидуальный, техногенный, экологический, социальный и экономический риск.

Индивидуальный риск – это вероятность реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций для одного человека. Его можно определить как отношение количества людей, погибших от реализации фактора риска, к общему количеству людей, подвергающихся воздействию данного фактора за определенный период времени:

$$R_{и} = \frac{P(t)}{L(f)}, \quad (6.3)$$

где $R_{и}$ – 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 .

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

Технический риск выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений:

$$R_{т} = \frac{\Delta T(t)}{T(f)}, \quad (6.4)$$

где $R_{т}$ – технический риск;

ΔT – число аварий в единицу времени t на идентичных технических системах и объектах;

T – число идентичных технических систем и объектов, подверженных общему фактору риска f .

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.

Экологический риск – это возможность появления неустранимых нарушений в состоянии окружающей среды: загрязнение местности вредными производственными отходами, изменение климатических особенностей территории (например, опустынивание или заболачивание земель), радиоактивное загрязнение, кислотные осадки и т. д. С точки зрения количественной оценки понятие «экологический риск» может быть сформулировано как отношение величины возможного ущерба от воздействия вредного экологического фактора за определённый 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. Нежелательные события экологического риска могут проявляться как непосредственно в зонах вмешательства, так и за их пределами:

$$R_o = \frac{\Delta O(t)}{O}, \quad (6.5)$$

где R_o – экологический риск;

ΔO – число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий в единицу времени t ;

O – число потенциальных источников экологических разрушений на рассматриваемой территории.

Масштабы экологического риска R_o^m оцениваются процентным соотношением площади кризисных или катастрофических территорий ΔS к общей площади рассматриваемого биогеоценоза S :

$$R_o^m = \frac{\Delta S}{S} 100 \quad (6.6)$$

В современных условиях основной источник экологического риска – техногенное влияние на окружающую природную среду, а наиболее распространенные факторы экологического риска – загрязнение водоемов, атмосферного воздуха вредными веществами, почвы отходами производства; изменение газового состава воздуха; энергетическое загрязнение биосферы.

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:

$$R_c = \frac{1000(C_2 - C_1)}{L}(t), \quad (6.7)$$

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.

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

$$R_э = \frac{В}{П}, \quad (6.8)$$

где $R_э$ – экономический риск, %;

$В$ – вред обществу от рассматриваемого вида деятельности;

$П$ – польза.

Использование рассматриваемых видов риска позволяет найти оптимальные решения по обеспечению безопасности и на уровне отдельного предприятия, и в более крупных масштабах.

6.3. Методология анализа и оценки риска

Методологическое обеспечение анализа риска представляет собой совокупность методов, методик и программных средств, позволяющих всесторонне выявить опасности и оценить риск чрезвычайной ситуации. При решении комплексных вопросов безопасности широко применяется методология риска, которая основана на определении вероятности нежелательных событий и тяжести их последствий. Используя количественные показатели риска, можно оценивать потенциальную опасность и сравнивать опасности различной природы. При этом в качестве показателей опасности чаще всего понимают индивидуальный или социальный риск гибели людей или риск причинения ущерба.

Анализ риска является неотъемлемой частью системного подхода к принятию политических решений и практических мер при решении задач предупреждения или уменьшения опасности для жизни человека, ущерба имуществу и окружающей среде, называемого *управление риском*.

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

Степень риска рассматривается как произведение вероятности возникновения конкретного опасного события и величины ущерба от его последствий. Степень риска можно представить как математическое ожидание величины ущерба от нежелательного события:

$$R(m) = \sum_{i=1}^n p_i m_i, \quad (6.9)$$

где p_i – вероятность наступления события, связанного с ущербом;
 m_i – величина причинённого ущерба.

Так как вероятность наступления неблагоприятного события – величина безразмерная, а ущерб измеряется в денежных единицах (в рублях), то степень риска также имеет размерность денежных единиц, что удобно при принятии управленческих решений.

Значение индивидуального риска используется для количественной оценки потенциальной опасности на конкретном рабочем месте или для определенного вида деятельности.

Значение социального риска применяется для интегральной количественной оценки опасных производственных объектов и характеристики масштаба воздействия аварии.

Можно выделить три общие составляющие процесса управления риском: сбор информации о текущем состоянии производственной безопасности, анализ риска и контроль производственной безопасности. Анализ риска базируется на собранной информации и определяет меры по контролю безопасности, поэтому основная задача анализа риска – обоснование решений при управлении риском (рис. 6.2).

Анализ риска или риск-анализ – это систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска для отдельных лиц или групп населения, имущества или окружающей среды.

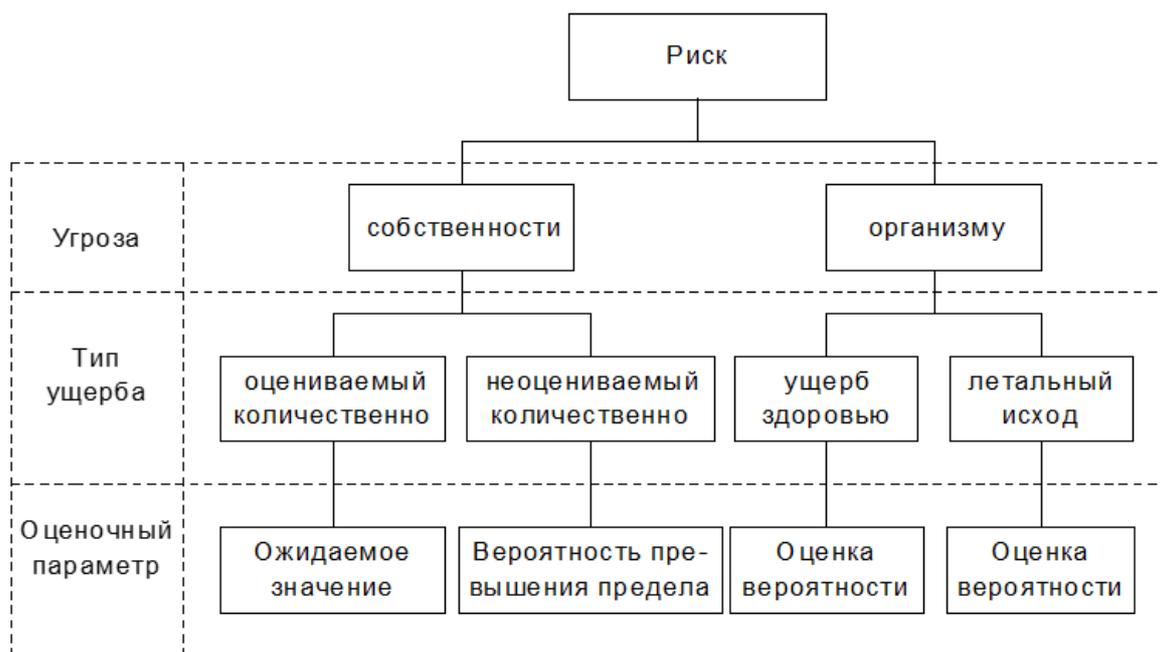


Рис. 6.2. Схема анализа риска

Анализ риска заключается в выявлении опасностей и оценке степени риска. При этом 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.

Оценка риска включает в себя анализ частоты возникновения нежелательных с точки зрения безопасности событий и анализ последствий этих событий.

Анализ риска проводится по следующей схеме:

1. Планирование и организация проведения анализа риска.
2. Идентификация опасностей.
 - 2.1. Выявление опасностей.
 - 2.2. Предварительная оценка характеристик опасностей.
3. Оценка риска.
 - 3.1. Анализ частоты возникновения опасных событий.
 - 3.2. Анализ последствий этих событий.
 - 3.3. Анализ неопределенностей при анализе риска.
4. Разработка рекомендаций по управлению риском.

Необходимо, чтобы применяемые методы (методики) удовлетворяли следующим требованиям:

- соответствие рассматриваемой технической системе;
- должны основываться на принципах и критериях, установленных в действующей нормативно-технической документации;
- полученные результаты должны способствовать наилучшему пониманию характера опасности, позволять выявить наиболее «слабые» места и процессы в системе функционирования объекта и наметить оптимальные пути управления риском.

Последовательность проведения анализа риска

1. Планирование и организация работ. На этом этапе необходимо:

- указать причины, вызывавшие необходимость проведения анализа риска;
- идентифицировать и описать анализируемую техническую систему;
- подобрать команду исполнителей, привлекаемых для проведения анализа риска;
- установить рабочие источники информации о безопасности системы;
- определить исходные данные для анализа риска;
- проанализировать неопределенности анализа риска;
- определить цели анализа риска и критерии приемлемого риска.

2. Идентификация опасностей. Основная задача – на основе собранной информации об объекте и опыта работы подобных систем выявить все присущие данной технической системе опасности. На этом же этапе проводится предварительная оценка опасностей с целью выбора одного из трех направлений деятельности:

- а) в случае незначительности выявленных опасностей прекратить дальнейший анализ;
- б) при значительной неопределенности выявленных опасностей провести более детальный анализ риска;
- в) выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

В первом случае процесс анализа риска может заканчиваться уже на этапе идентификации опасностей.

3. Оценка риска. Из всех идентифицированных опасностей необходимо выбрать опасности с неприемлемым уровнем риска. При этом критерии приемлемого риска и результаты оценки риска могут быть

выражены качественно (в виде текстового описания) или количественно (например, в виде количества несчастных случаев или аварий в год).

Оценка риска включает в себя анализ вероятности возникновения опасного события и анализ тяжести последствий этих событий. Однако, когда тяжесть последствий незначительна или событие крайне маловероятно, достаточно оценить один параметр. Для анализа частоты обычно используются:

- исторические данные по соответствующим типам технических систем или видам деятельности;
- статистические данные по аварийности и надежности оборудования;
- логические методы анализа «деревьев событий» или «деревьев отказов»;
- экспертная оценка с учетом мнения специалистов в данной области.

Анализ тяжести последствий включает в себя оценку воздействия на людей, имущество или окружающую среду. Для прогнозирования последствий необходимо понимать сущность происходящих аварийных процессов, действующих поражающих факторов и оценить степень поражения изучаемых объектов воздействия.

В ходе проведения оценки риска следует проанализировать возможную неопределенность результатов, вызванную неточностью информации по надежности оборудования и ошибкам персонала, а также принятыми допущениями в применяемых при расчете моделях аварийного процесса. Анализ неопределенности – это оценка неопределенности результатов оценки риска, вызванной неопределенностью исходных данных и точностью использованных моделей.

Следует подчеркнуть, что часто сложные и дорогостоящие расчеты дают значение риска, точность которого очень невелика.

Качественные (инженерные) методы анализа риска, позволяют достигать основных целей анализа риска при использовании меньшего объема информации и затрат труда. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях – единственно возможны, в частности, для сравнения опасностей различной природы или при экспертизе особо опасных сложных технических систем.

4. Разработка рекомендаций по управлению риском. Существующий риск может быть признан приемлемым, в противном случае необходимо указать меры по его уменьшению. Меры по управлению риском могут иметь технический, эксплуатационный или организационный характер.

Следует заметить, что иногда могут происходить события, считавшиеся ранее чрезвычайно маловероятными. Тяжесть последствий таких событий может быть очень велика. Например, катастрофа океанского лайнера «Титаник» или авария на японской атомной электростанции «Фукусима». В обоих случаях произошли природные катаклизмы, ранее никогда не наблюдавшиеся и считавшиеся невероятными. Технические системы попали в условия эксплуатации, при которых их функционирование стало невозможно.

6.4. Качественные методы анализа риска

Существуют следующие методы идентификации возможных опасностей:

1. Инженерные методы. На основе собранных статистических данных проводится вероятностный анализ опасностей, производится построение деревьев опасности.

2. Модельные методы. По накопленным исходным данным и результатам наблюдений строят модели воздействия вредных и опасных факторов на отдельного человека, профессиональные и социальные группы населения.

3. Экспертные методы. Проводится оценка вероятностей опасных событий с помощью опроса экспертов в данной области науки, техники или технологий.

4. Социологические методы. Определяются вероятности опасных событий путем опроса населения.

Для более точной и достоверной оценки риска эти методы применяют совместно.

Качественные методы анализа опасностей позволяют определить источники возникновения опасностей, возможные аварии или несчастные случаи, разработать мероприятия для предотвращения опасных событий и снижения тяжести их последствий.

Перед проведением качественного анализа необходимо идентифицировать источники опасностей. Для этого собирают исходные данные и проводят предварительный анализ опасностей.

При анализе опасностей выбор определенного качественного метода зависит от цели анализа и особенностей технической системы. Существуют следующие качественные методы анализа опасностей:

- предварительный анализ опасностей;
- анализ последствий отказов;
- анализ опасностей с помощью «дерева причин»;
- анализ опасностей с помощью «дерева последствий»;
- анализ опасностей методом потенциальных отклонений;
- анализ ошибок персонала;
- причинно-следственный анализ.

Предварительный анализ опасностей (ПАО) заключается в выявлении источника опасностей, определении причин возникновения опасных состояний и характеристике опасностей в зависимости от вызываемых ими последствий.

Порядок предварительного анализа опасностей:

1. Определение технических характеристик технической системы, процесса, используемых источников энергии, материалов и их повреждающих свойств.
2. Поиск нормативно-технической документации, действие которой распространяется на данную техническую систему или процесс.
3. Проводят проверку используемой технической документации на ее соответствие нормам и правилам безопасности.
4. Составляют перечень опасностей, в котором указывают идентифицированные источники опасностей, возможные поражающие факторы, ход протекания потенциальных аварий и другие выявленные недостатки.

В ходе ПАО осуществляется первая попытка выявить потенциально опасные части технической системы и отдельные события, которые могут привести к возникновению опасностей. Этот анализ выполняется на начальном этапе разработки системы. Детальный анализ возможных событий обычно проводится после того, как система полностью определена с помощью дерева отказов.

Анализ последствий отказов (АПО) – качественный метод идентификации опасностей, основанный на системном подходе, позволяющий сделать определенные прогнозы. АПО – анализ индуктивного типа, с помощью которого систематически, на основе последо-

вательного рассмотрения одного элемента за другим анализируются все возможные виды отказов или аварийные ситуации и выявляется их результирующее воздействие на систему.

Изучение отдельных аварийных ситуаций и отказов элементов позволяет определить их воздействие на другие близлежащие элементы и систему в целом. АПО проводят в следующем порядке:

1. Техническую систему подразделяют на составляющие компоненты.

2. Для каждого составляющего систему компонента выявляют все возможные отказы.

3. Изучают все потенциальные аварии, которые могут быть вызваны отказами компонентов исследуемого объекта.

4. Отказы ранжируют по степени опасности и разрабатывают меры, позволяющие избежать возникновения этих отказов.

При помощи АПО можно оценить потенциальную опасность любого технического объекта.

Анализ опасностей с помощью «дерева причин» потенциальной аварии (АОДП) позволяет выявить комбинации отказов оборудования, ошибок персонала и внешних воздействий, приводящих к аварийной ситуации (основному событию). АОДП выполняют в следующем порядке:

1. Выбирают возможное событие – аварию или отказ, которые могут привести к аварии.

2. Выявляют факторы, которые могут привести к заданной аварии.

3. Строят ориентированный граф – «дерево», вершина (корень) которого является потенциальной аварией.

Проведение анализа с помощью дерева причин возможно только после детального изучения рабочих функций всех компонентов рассматриваемой технической системы. На работу системы оказывает влияние человеческий фактор, например возможность совершения оператором ошибки. Поэтому желательно все потенциальные инциденты – «отказы операторов» – вводить в содержание дерева причин-отказов. Дерево отражает статический характер событий. Построением нескольких деревьев можно отразить их динамику, т. е. развитие событий во времени. Для определения последовательности событий при аварии, включающей сложные взаимодействия между техническими системами обеспечения безопасности, используется дерево событий.

Анализ опасностей с помощью «дерева последствий» потенциальной аварии (АОДПО) отличается от АОДП тем, что в этом случае задается критическое событие – инициатор, и исследуют всю группу событий – последствий, к которым оно может привести. Анализ причин последствий начинается с выбора критического события. Критические события выбирают таким образом, чтобы они служили удобными отправными точками для анализа, причем большинство аварийных ситуаций развивается за критическим событием в виде цепи отдельных событий. Процедура построения диаграммы – дерева последствий – состоит из выбора первого иницирующего события, за которым следуют другие события, определенные на данном этапе работы.

При анализе «причин – последствий» используются комбинированные методы дерева отказов (выявить причины) и дерева событий (показать последствия), причем все явления рассматриваются в естественной последовательности их появления.

Анализ опасностей методом потенциальных отклонений (АОМПО) включает процедуру искусственного создания отклонений с помощью ключевых слов. Для этого разбивают технологический процесс или техническую систему на составные части и, создавая с помощью ключевых слов отклонения, систематично изучают их потенциальные причины и те последствия, к которым они могут привести на практике.

Анализ ошибок персонала (АОП) – один из важнейших элементов методологии оценки опасностей; позволяет учесть воздействие человеческого фактора, т. е. учесть как ошибки, иницирующие или усугубляющие аварийную ситуацию, так и способность персонала совершать корректирующие действия по управлению аварией.

АОП включает следующие этапы:

- 1) выбор системы и вида работы;
- 2) определение цели;
- 3) идентификацию вида потенциальной ошибки;
- 4) идентификацию последствий;
- 5) идентификацию возможности исправления ошибки;
- 6) идентификацию причины ошибки;
- 7) выбор метода предотвращения ошибки;
- 8) оценку вероятности ошибки;

- 9) оценку вероятности исправления ошибки;
- 10) расчет риска;
- 11) выбор путей снижения риска.

Причинно-следственный анализ (ПСА) выявляет причины происшедшей аварии или катастрофы и является составной частью общего анализа опасностей. Он завершается прогнозом новых аварий и составлением плана мероприятий по их предупреждению. ПСА включает следующие этапы:

1. Точное и объективное описание аварии.
2. Определение событий, предшествовавших аварии.
3. Построение ориентированного графа – дерева причин, начиная с последней стадии развития событий, т. е. с самой аварии.
4. Выявление логических связей дерева причин;
5. Разработка предупредительных мер для исключения повторения аналогичных аварий.

6.5. Количественная оценка риска

Количественный анализ опасностей дает возможность рассчитать вероятности возникновения опасных событий и тяжесть последствий этих событий. Для проведения количественного анализа применяются статистический анализ и различные методы расчета вероятностей.

Для удобства расчетов 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 как функции отдельных составляющих событий являются одной из задач анализа опасностей.

Подсистемой «И» называют ту часть системы, компоненты которой соединены параллельно. К отказу такой подсистемы приводит отказ всех ее компонентов.

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

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i), \quad (6.10)$$

где $P(A)$ – вероятность события A (отказ всей подсистемы «И»);
 $P(A_i)$ – вероятность отказа i -го компонента подсистемы «И»;
 n – общее количество компонентов подсистемы «И».

На практике подсистемы «И» создают дублированием или резервированием. Данный технический прием применяют в случае, если необходимо достичь высокой степени надежности системы, особенно в системах, обеспечивающих безопасность.

Подсистемой «ИЛИ» называют часть системы, компоненты которой соединены последовательно. К нежелательному событию в такой подсистеме приводит отказ любого компонента.

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

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(A_i)) \quad (6.11)$$

Для равновозможных отказов вероятность отказа в этой подсистеме

$$P(A) = 1 - (1 - p)^n. \quad (6.12)$$

Выражение (6.12) свидетельствует о высокой вероятности отказа в сложных системах, даже состоящих из элементов с высокой надежностью. Например, при вероятности отказа компонента $p = 0,05$ подсистема «ИЛИ», состоящая из 20 компонентов ($n = 20$), имеет вероятность того, что отказа в подсистеме не произойдет, равную

$$(1 - p)^n = (1 - 0,05)^{20} \approx 0,358.$$

При анализе риска следует учитывать следующие аспекты:

1. Устройства, операции, действия персонала, которые с точки зрения безопасности выполняют одни и те же функции в системе, могут считаться соединенными параллельно.
2. Устройства, операции, действия персонала, каждое из которых необходимо для предотвращения опасного события, должны рассматриваться как соединенные последовательно.

На практике зачастую подсистемы «И» или «ИЛИ» могут состоять из компонентов, в свою очередь соединенных в подсистемы «И» или «ИЛИ» в любых комбинациях.

Вероятность возникновения опасности – величина, существенно меньшая единицы. Кроме того, точки реализации опасности распределены в пространстве и времени. Это значит, что, например, вероятность пожара в одном здании населенного пункта гораздо выше, чем вероятность одновременного пожара всех зданий этого населенного пункта, или вероятность пяти подряд очень холодных зим гораздо ниже вероятности одной очень холодной зимы.

Таким образом, чем больший отрезок времени или количество рискующих субъектов мы возьмем, тем определеннее станет величина ущерба, который субъекты получают в совокупности за этот отрезок времени.

В терминах риска принято описывать и опасности от достоверных событий, происходящих с вероятностью, равной единице. Таким примером является загрязнение окружающей среды отходами конкретного промышленного предприятия. В этом случае «риск» эквивалентен степени риска и соответственно величина риска равна величине ущерба.

Обычно при оценке степени риска его характеризуют двумя величинами – вероятностью события P и последствиями X , которые в выражении математического ожидания выступают как сомножители:

$$R = PX. \quad (6.13)$$

По отношению к источникам опасностей оценка риска предусматривает разграничение нормального режима работы R_n и аварийных ситуаций $R_{ав}$:

$$R = R_n + R_{ав} = P_n X_n + P_{ав} X_{ав}. \quad (6.14)$$

В случае когда последствия неизвестны, под риском понимают вероятность наступления определенного сочетания нежелательных событий

$$R = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (6.15)$$

При необходимости можно использовать определение риска как вероятности превышения предела x :

$$R = P\{\xi > x\}, \quad (6.16)$$

где ξ – случайная величина.

Техногенный риск оценивают по формуле, включающей вероятность нежелательного события и величину последствий в виде ущерба U :

$$R = PU. \quad (6.17)$$

Если каждому нежелательному событию, происходящему с вероятностью P_i , соответствует ущерб U_i , то величина риска будет представлять собой ожидаемую величину ущерба U^* :

$$R = U^* = \sum_{i=1}^n P_i U_i. \quad (6.18)$$

Если все вероятности наступления нежелательного события одинаковые ($P_i = P, i = 1, \dots, n$), то

$$R = P \sum_{i=1}^n U_i. \quad (6.19)$$

Когда существует опасность здоровью и материальным ценностям, риск целесообразно представлять в векторном виде с различными единицами измерения по координатным осям

$$\vec{R} = \vec{U}\vec{P}. \quad (6.20)$$

Перемножение в правой части этого уравнения производится покомпонентно, что позволяет сравнивать риски.

Индивидуальный риск можно определить как ожидаемое значение причиняемого ущерба U^* за интервал времени T и отнесенное к группе людей численностью M человек:

$$R = U^*/MT. \quad (6.21)$$

Общий риск для группы людей (коллективный риск)

$$R = U^*/T. \quad (6.22)$$

Пример 1. Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия в технической системе, состоящей из трех подсистем, с независимыми отказами. Вероятности отказов подсистем: $P_1 = 10^{-3}$, $P_2 = 10^{-4}$, $P_3 = 10^{-2}$, ожидаемые ущербы от отказов подсистем $U_1 = 10^6$ руб., $U_2 = 5 \cdot 10^6$ руб., $U_3 = 10^5$ руб.

Решение.

Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы как ожидаемую величину ущерба

$$R = U = \sum_{i=1}^3 P_i U_i = P_1 U_1 + P_2 U_2 + P_3 U_3 = 10^{-3} \cdot 10^6 + 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^6 + 10^{-2} \cdot 10^5 = 2\,500 \text{ руб.}$$

Пример 2. Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия в технической системе, состоящей из пяти подсистем, с независимыми равновероятными отказами $P = 10^{-2}$. Ожидаемые ущербы от отказов подсистем $U_1 = 10^6$, $U_2 = 10^7$, $U_3 = 10^8$, $U_4 = 10^9$, $U_5 = 10^{10}$.

Решение.

Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы с равновероятными отказами подсистем как ожидаемую величину ущерба

$$R = U = P \sum_{i=1}^5 U_i = P(U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5) = 10^{-2}(1 + 10 + 10^2 + 10^3 + 10^4)10^6 = 11\,110\,000 \text{ руб.}$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается разница между понятиями «риск» и «степень риска»?
2. Что такое «приемлемый риск»?
3. Какие виды риска можно выделить в зависимости от факторов риска и объектов риска?
4. С какой целью проводят анализ риска?
5. Какова последовательность проведения анализа риска?
6. С какой целью проводят оценку риска? Порядок проведения оценки риска.
7. Какие существуют качественные методы анализа опасностей?
8. Каков порядок осуществления анализа опасностей качественными методами?
9. Для чего проводится количественный анализ опасностей?
10. По каким формулам подсчитывается вероятность отказа в подсистемах «И» и «ИЛИ»?
11. В каких случаях риск эквивалентен степени риска?

Глава 7. ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКА

Возникновение и ход протекания промышленных аварий и техногенных катастроф, как правило, характеризуются комбинацией различных случайных локальных событий, возникающих с заранее неизвестной вероятностью на разных стадиях аварии (отказы оборудования; человеческие ошибки при проектировании и эксплуатации; воздействия непредсказуемых форс-мажорных обстоятельств). Для того чтобы выявить причинно-следственные связи между этими событиями, необходимо применить логико-графические методы построения деревьев отказов и событий.

При построении *дерева отказов* выявляют комбинации отказов оборудования, ошибок персонала и внешних (природных или техногенных) воздействий, приводящих к основному событию (аварийной ситуации). Метод используется для определения возможности возникновения аварийной ситуации и расчета ее вероятности (на основе задания вероятностей исходных событий).

Дерево событий – последовательность событий, исходящих из основного (конечного) события (аварийная ситуация). Применяется для анализа развития аварийной ситуации.

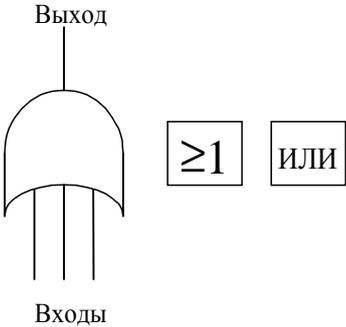
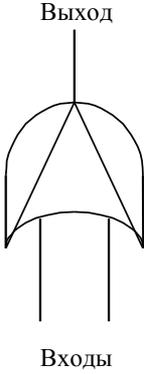
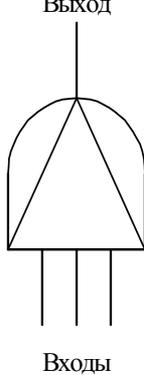
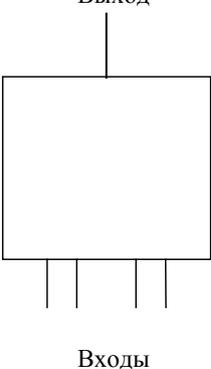
7.1. Определения и символы, используемые при построении деревьев

При построении деревьев отказов и деревьев событий принято использовать специальные символы и условные обозначения. Ниже приведена табл. 7.1 с наиболее часто употребляемыми из них.

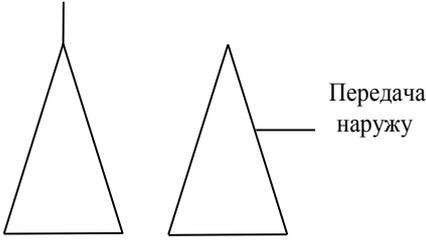
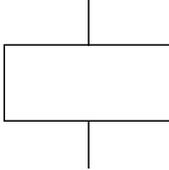
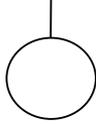
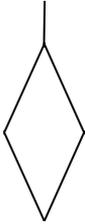
Таблица 7.1

Определения и символы

Определение	Символ
<p>1. <i>Схема «И»</i> (схема совпадения) – сигнал на выходе появляется только тогда, когда поступают все входные сигналы (умножение событий)</p>	

Определение	Символ
<p>2. <i>Схема «ИЛИ»</i> (схема объединения) – сигнал на выходе появляется при поступлении на вход любого одного или большего числа сигналов (сумма событий)</p>	
<p>3. <i>Схема «Исключающее ИЛИ»</i>: сигнал на выходе рассматривается как промежуточное событие и появляется при поступлении на вход одного и только одного входного сигнала</p>	
<p>4. <i>Схема «И с приоритетом»</i>: логически эквивалентна схеме «И», но входные сигналы должны поступать в определенном, заранее заданном порядке</p>	
<p>5. <i>Специальная схема</i>: отображает любую другую разрешенную комбинацию входных сигналов</p>	

Окончание табл. 7.1

Определение	Символ
<p>6. <i>Вход</i> или <i>выход</i> 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</p>	<p>Передача внутри</p>  <p>Передача наружу</p>
<p>7. <i>Результирующее событие</i>: наступает в результате заранее определенной комбинации неисправностей на входе логической схемы</p>	
<p>8. <i>Первичный отказ (или неисправность элемента)</i></p>	
<p>9. <i>Неполное событие</i> – это неисправность, причины которой на данном этапе исследования не удалось однозначно определить из-за отсутствия необходимой информации или она не представляет интереса. Такое событие может быть детализировано путем показа вызывающих его первичных неисправностей</p>	

7.2. Анализ деревьев отказов

Опасности существуют всегда, но явно проявляются лишь в исключительных случаях. Для реализации потенциальной опасности необходимо выполнение определенных условий, которые принято называть *причинами возникновения опасности*.

Опасность – следствие некоторой причины или группы причин, которые, в свою очередь, могут являться следствием другой причины или группы причин. Причины и следствия образуют сложные иерар-

хические структуры или системы, для графической иллюстрации этих структур и систем используют следующие схемы: дерево событий, дерево причин, дерево отказа, дерево опасности, дерево неисправностей.

Процедура построения дерева неисправностей (отказов) включает, как правило, следующие этапы:

1. Определение нежелательного (завершающего) события.
2. Тщательное изучение предполагаемого режима использования системы и её возможное поведение.
3. Определение функциональных свойств событий более высокого уровня для выявления причин тех или иных неисправностей системы и проведение более глубокого анализа поведения системы с целью выявления логической взаимосвязи событий более низкого уровня, способных привести к отказу системы.

4. Построение дерева неисправностей (отказов) для логически связанных событий на входе. Эти события должны определяться в терминах идентифицируемых независимых первичных отказов. Чтобы получить количественные результаты для завершающего нежелательного события дерева, необходимо задать вероятность отказа, коэффициент готовности, 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 следующих процедур: определение границ системы, построение дерева неисправностей, качественная оценка, количественная оценка.

Обычно система изображается в виде блок-схемы, показывающей все функциональные взаимосвязи и элементы. При построении дерева неисправностей исключительно важную роль приобретает правильное задание граничных условий. Одним из основных требований, предъявляемых к граничным условиям, является выбор завершающего нежелательного события, произвести который необходимо с особой тщательностью, поскольку именно для него и строится дерево неисправностей. Кроме того, чтобы проводимый анализ был поня-

тен всем заинтересованным лицам, исследователь обязан составить перечень всех допущений, принимаемых при определении системы и построении дерева неисправностей.

7.3. Построение дерева отказов

Прежде чем приступить к построению дерева неисправностей, необходимо самым тщательным образом изучить техническую систему. Дерево отказов используется для условного представления существующих в технической системе условий, потенциально способных вызвать ее отказ, а также для выявления существующих в ней слабых с точки зрения надежности мест. В зависимости от конкретных целей анализа дерева неисправностей для построения последнего специалисты по надежности обычно используют либо метод первичных отказов, либо метод вторичных отказов, либо метод инициированных отказов.

Метод первичных отказов. Отказ элемента называется первичным, если он происходит в нормальных условиях функционирования системы. Построение дерева неисправностей на основе учета 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 1. Построить дерево отказов для простейшей системы освещения, электрическая схема которой показана на рис. 7.1. Электрическая лампочка 2 последовательно соединена через выключатель 1 с источником питания 3. Считается, что отказ выключателя состоит лишь в том, что он не замыкается, отказами электрической проводки можно пренебречь, а завершающим событием является отсутствие освещения.

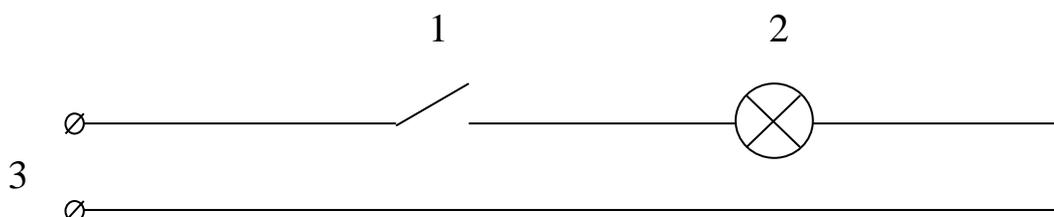


Рис. 7.1. Электрическая схема системы освещения

Дерево отказов для этой системы представлено на рис 7.2. Основными, или первичными, событиями дерева неисправностей являются (1) отказ источника питания E_1 , (2) отказ выключателя E_2 и (3) перегорание (отказ) лампочки E_3 .

Наибольший интерес представляет завершающее событие – «отсутствие освещения», и поэтому именно ему уделяется основное внимание при анализе. Дерево неисправностей, изображенное на рис. 7.2, показывает, что исходные события представляют собой входы схемы «ИЛИ»: при наступлении любого из трех первичных событий E_1 , E_2 , E_3 происходит завершающее событие (отсутствие освещения).

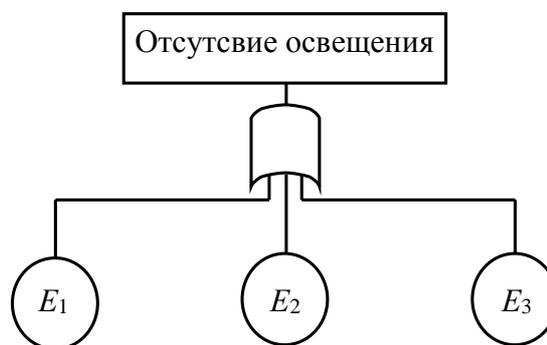


Рис. 7.2. Дерево отказов для случая первичных отказов

Метод вторичных отказов. Так как вторичные отказы могут вызываться неблагоприятным воздействием окружающих условий, чрезмерными нагрузками на элементы системы в процессе эксплуатации или первичными отказами самих элементов системы, необходимо более глубокое исследование технической системы.

Пример 2. На рис 7.3 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 генератора и предохранителя. Вторичные отказы изображаются прямоугольником как промежуточное событие.

Вторичные отказы, изображенные на рис. 7.3, происходят вследствие неудовлетворительного технического обслуживания, неблагоприятного воздействия внешней среды, стихийного бедствия и т. д.

Метод инициированных отказов. Подобные отказы возникают при правильном использовании элемента, но в неустановленное время или в неполюженном месте. Другими словами, инициированные отказы – это сбои операций координации событий на различных уровнях дерева неисправностей: от первичных отказов до завершающего события (нежелательного либо конечного).

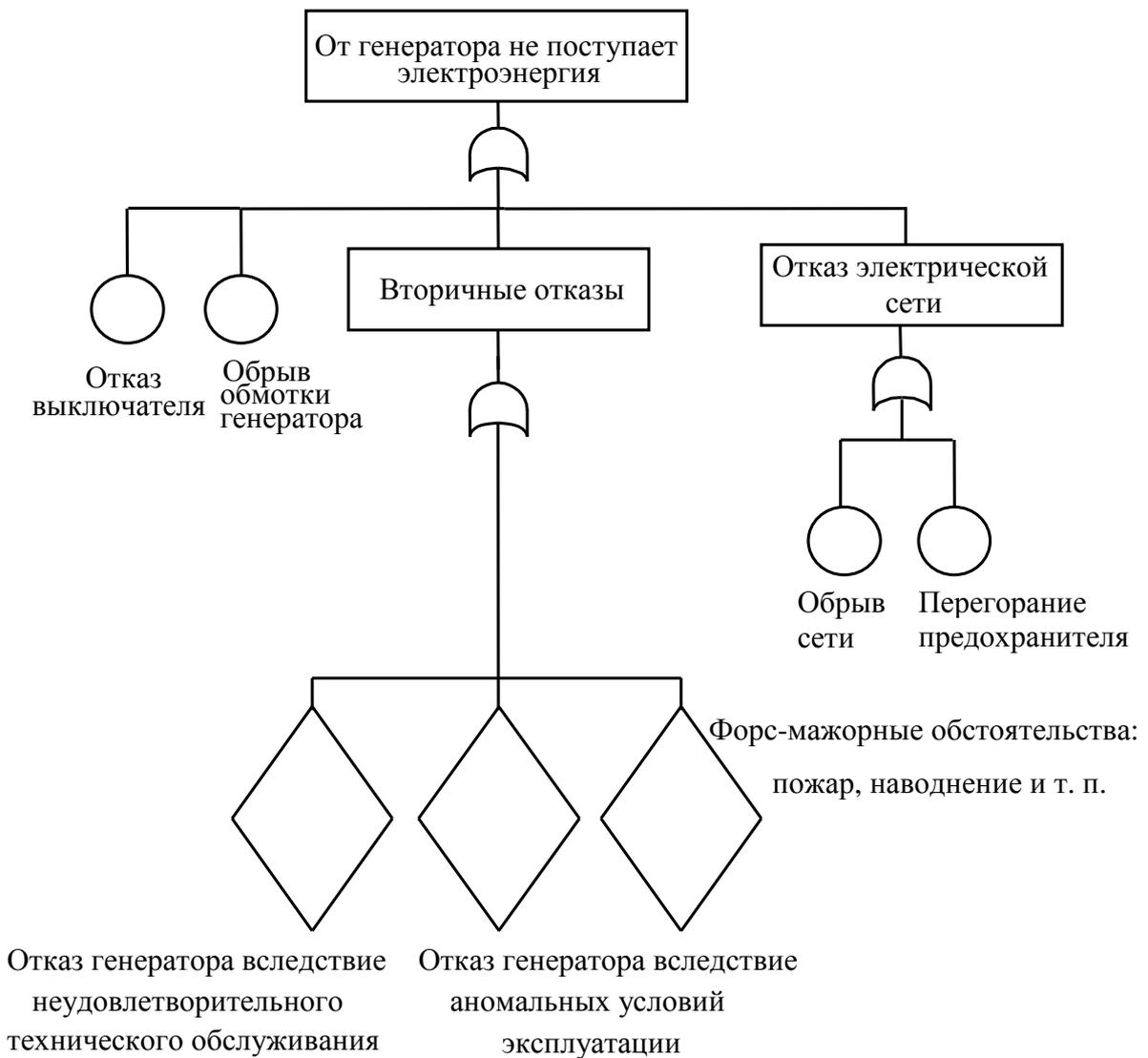


Рис. 7.3. Дерево неисправностей для случая вторичных отказов

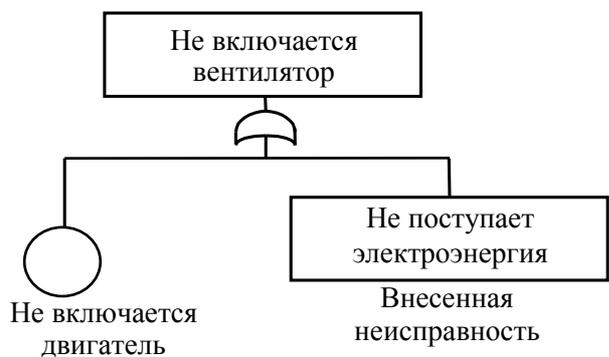


Рис. 7.4. Дерево неисправностей для случая основных и инициированных отказов

Пример 3. Типичный пример инициированного отказа – поступление ошибочного сигнала на какое-либо электротехническое устройство (например, двигатель или преобразователь). Взаимосвязь между основными и инициированными отказами показана на рис. 7.4.

Многообразии причин аварийности и травматизма наиболее полно и удобно представляется в виде диаграммы – дерева причин, отражающего процесс появления и развития цепи предпосылок. Основными компонентами диаграммы причин или опасностей являются узлы (или вершины) и взаимосвязи между ними. В качестве узлов подразумеваются события, свойства и состояния элементов рассматриваемой системы, а также логические условия их трансформации (сложение «ИЛИ» и перемножение «И»).

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

В вероятностном аспекте такая операция выражается логическим произведением

$$P(A) = P(B)P(V). \tag{7.1}$$

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

$$P(\Gamma) = P(D) + P(E) - P(D)P(E). \tag{7.2}$$

Пример 4. Гибель человека от поражения электрическим током может произойти при включении его тела в электрическую цепь с достаточной для нанесения поражения силой тока. Следовательно, чтобы произошел несчастный случай (головное событие «А»), необходимо одновременное существование трех событий (рис. 7.5).

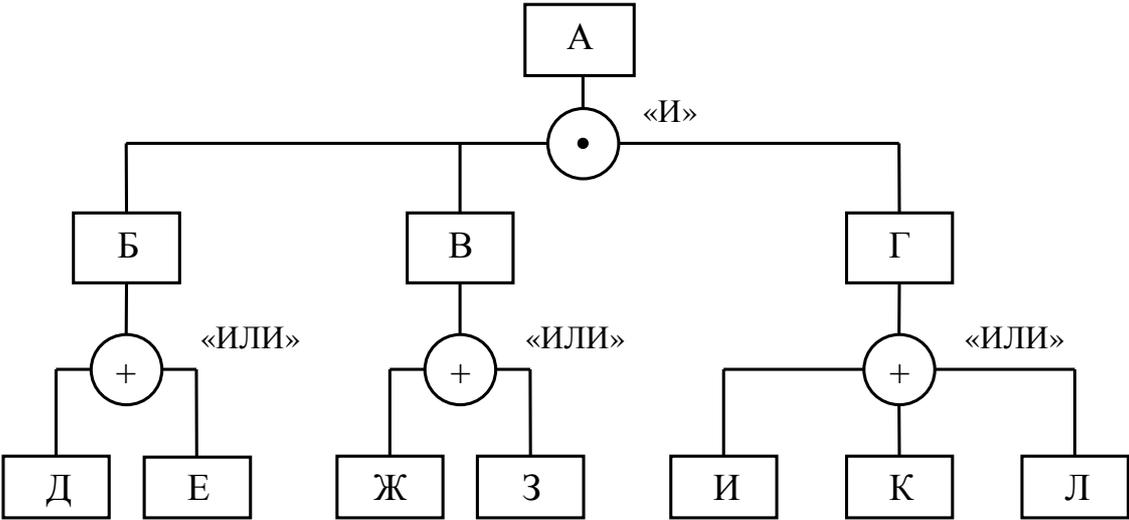


Рис. 7.5. Дерево причин поражения человека электрическим током

Событие «Б» – наличие потенциально высокого напряжения на корпусе электрической установки.

Событие «В» означает появление человека на токопроводящем основании, соединенном с землей.

Событие «Г» – касание телом человека корпуса электроустановки.

В свою очередь, событие «Б» может быть следствием любого из двух событий – предпосылок «Д» и «Е», где «Д» – понижение сопротивления изоляции токоведущих частей, «Е» – касание токоведущими частями корпуса установки.

Событие «В» также обуславливается двумя предпосылками: «Ж» – вступление человека на токопроводящее основание, «З» – касание незащищенной поверхностью тела человека заземленных элементов помещения.

Событие «Г» является результатом появления одной из трех предпосылок: «И» – потребность ремонта, «К» – потребность техобслуживания, «Л» – использование электроустановки по назначению, или нормальная эксплуатация установки.

Анализ дерева опасности состоит в выявлении условий, минимально необходимых и достаточных для возникновения или невозникновения головного события «А». Аналитически выражение условия реализации данного несчастного случая имеет вид:

$$P(A) = P(B) P(V)P(\Gamma) = [P(D) + P(E)] [P(\text{Ж}) + P(\text{З})] [P(\text{И}) + P(\text{К}) + P(\text{Л})]. \quad (7.3)$$

Пример 5. В автотранспортном предприятии автомобиль-тягач из-за технической неисправности был отправлен в ремонт, а на замену ему из резерва был взят другой. Никто не обратил внимания на то, что резервный автомобиль-тягач оказался другой модели. Сцепное устройство резервного автомобиля было такой же конструкции, только расположено на другой высоте от земли.

Во дворе предприятия водитель автомобиля приступил к сцепке тягача с прицепом. Из-за того, что сцепные устройства тягача и при-

цепы оказались расположены на различной высоте, произвести сцепку оказалось невозможно. Водитель покинул автомобиль для того, чтобы выяснить причину невозможности произвести сцепку, забыв поставить тягач на стояночный тормоз. В тот момент, когда водитель находился между прицепом и тягачом, тягач из-за вибрации, вызванной работающим двигателем, покати́лся назад по небольшому уклону и придавил водителя к раме прицепа. В результате водитель получил телесные повреждения средней тяжести.

Дерево причин данного несчастного случая представлено на рис. 7.6.

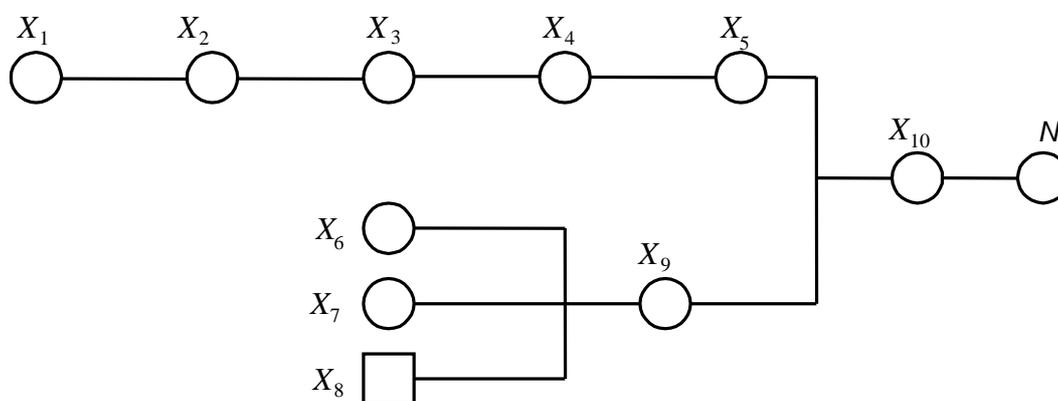


Рис. 7.6. Дерево причин аварии автомобиля-тягача:

- 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 – сцепка невозможна;
- 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)

Заметим, что X_8 – фактор постоянного характера, а остальные факторы носят случайный характер.

Анализ происшествия состоит в выяснении причин несчастного случая, выявлении источников опасности и выработке предупредительных мероприятий. Результаты анализа приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.1

Результаты анализа происшествия

Причины несчастного случая	Источники опасности	Предупредительные мероприятия
Двор с уклоном	Неподходящее место стоянки автомобилей	Реконструкция двора
Тягач, вышедший из строя	Поломка оборудования	Предупредительный ремонт транспортных средств
Разная высота расположения сцепных устройств прицепа и тягача	Техническая несовместимость оборудования	Стандартизация соединения оборудования
Не включен стояночный тормоз, работающий двигатель	Недостаточная подготовка персонала	Инструктаж водителей

Пример 6. При построении дерева событий для определения безопасности выполнения сварочных работ исходное событие аварии (ИСА) – искра, вызывающая возгорание. В случае возникновения задымления в помещении автоматически срабатывает спринклерная система пожаротушения (ССП). При большом очаге пожара необходимо в соответствии с инструкцией включить систему пожаротушения (СП) и вызвать пожарных. Возможное «дерево событий» представлено на рис. 7.7, а, где «ступенька» вверх означает срабатывание соответствующей системы, а «ступенька» вниз – ее отказ.

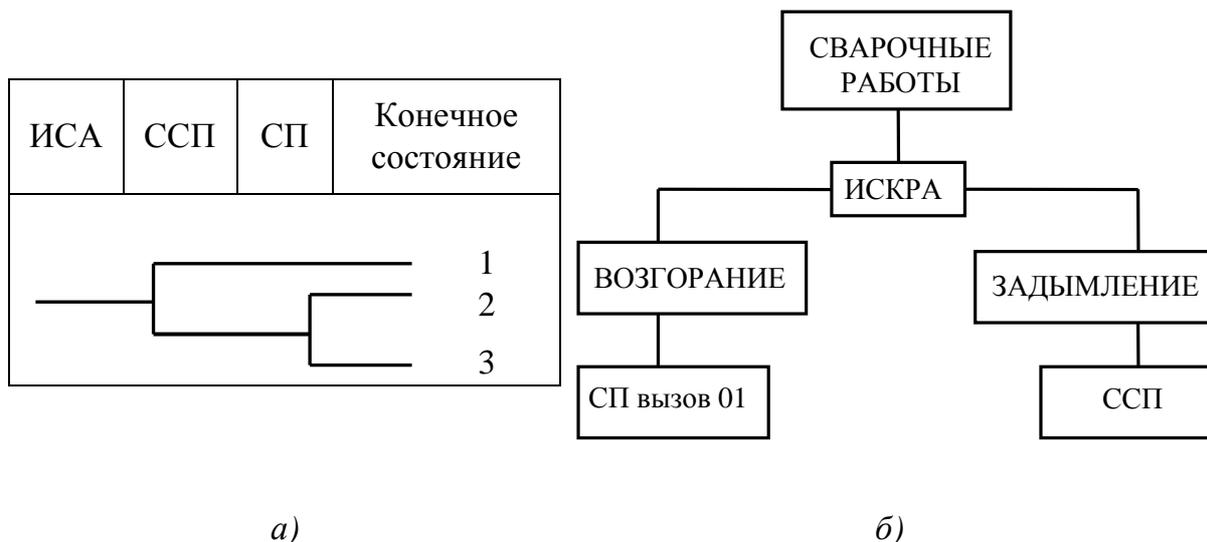
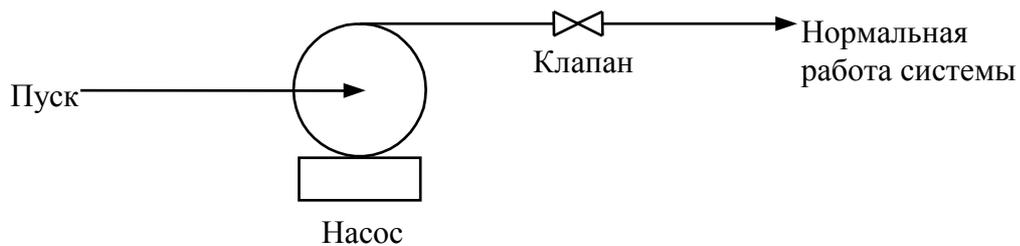


Рис. 7.7. Дерево событий при выполнении сварочных работ:
 а – принципиальная схема; б – диаграмма событий

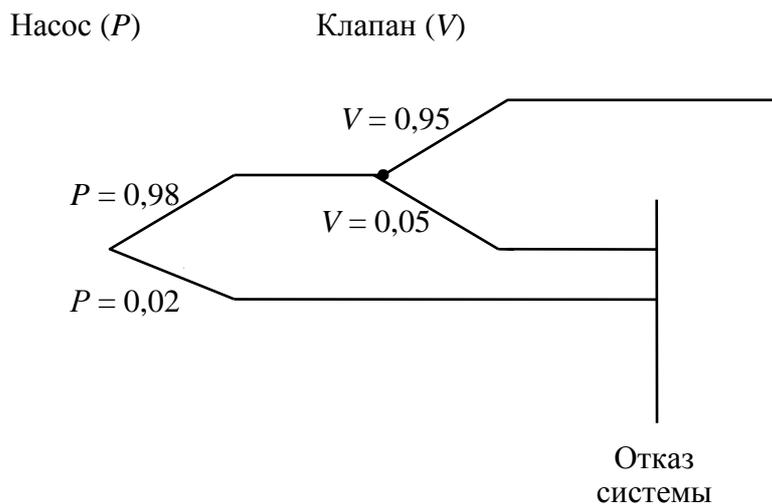
Анализ конечных условий показывает, что состояние под номером 3 связано с тяжелыми последствиями, поэтому путь, приводящий к конечному состоянию 3, является аварийным. Если известны вероятность наступления ИСА и вероятность отказов ССП и СП, то с помощью методов теории вероятностей можно рассчитать риск пожара с тяжелыми последствиями.

При анализе очередного исходного события аварии 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.

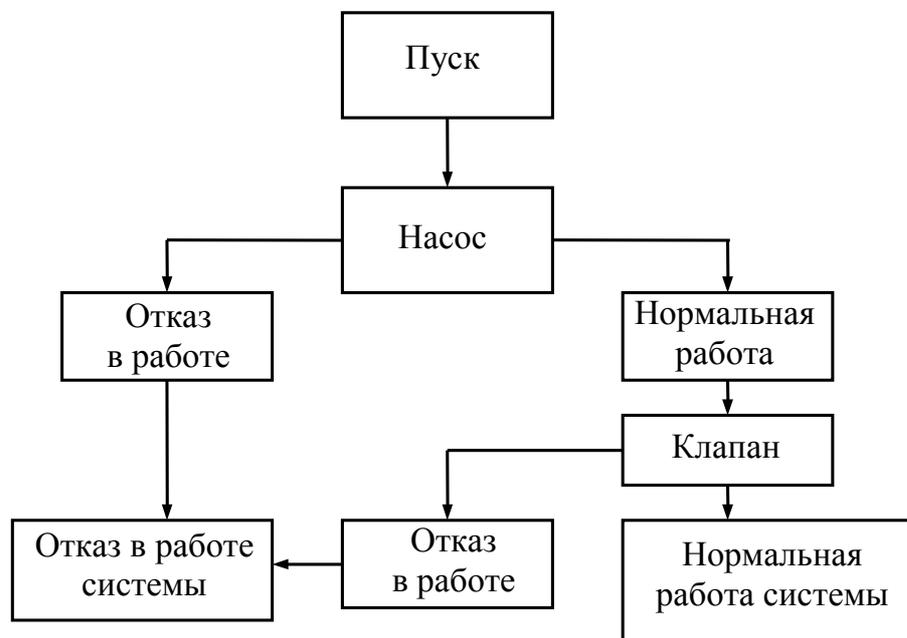
Пример 7. На рис. 7.8 показана система последовательно соединенных элементов, которая включает насос и клапан, имеющие соответственно вероятности безотказной работы 0,98 и 0,95, а также приведено дерево решений для этой системы. Согласно принятому правилу верхняя ветвь соответствует желательному варианту работы системы, а нижняя – нежелательному. Дерево решений читается слева направо. Если насос не работает, система отказывает независимо от состояния клапана. Если насос работает, с помощью второй узловой точки изучается ситуация, работает ли клапан.



а)



б)



в)

Рис. 7.8. Дерево решений для двухэлементной схемы (работа насоса):
 а – принципиальная схема; б – дерево решений; в – диаграмма решений

Вероятность безотказной работы системы $P = 0,98 \cdot 0,95 = 0,931$.
 Вероятность отказа $Q = 0,98 \cdot 0,05 + 0,02 = 0,069$, и суммарная вероятность двух состояний системы равна единице.

Этот результат можно получить другим способом с помощью таблицы истинности (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Таблица истинности

Состояние насоса	Состояние клапана	Вероятность работоспособного состояния системы	Вероятность отказа системы
Работает	Работает	$0,98 \times 0,95$	–
Отказ	Работает	–	$0,02 \times 0,95$
Работает	Отказ	–	$0,98 \times 0,05$
Отказ	Отказ	–	$0,02 \times 0,05$
Суммарная величина		0,931	0,069

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

7.4. Качественная и количественная оценка дерева отказов

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

Сечение определяется как множество элементарных событий, приводящих к нежелательному исходу. Если из множества событий, принадлежащих некоторому сечению, нельзя исключить ни одного, и в то же время это множество событий приводит к нежелательному исходу, то в этом случае говорят о наличии *минимального сечения*. Выявление минимальных сечений требует больших затрат времени, и для их нахождения требуется машинный алгоритм. Пример качественной оценки дерева неисправностей представлен на рис. 7.9.

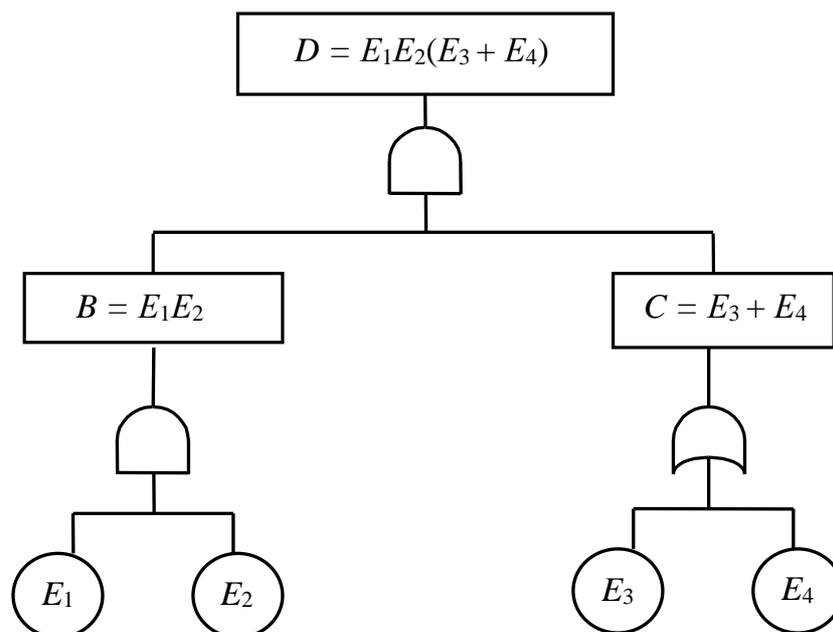


Рис. 7.9. Дерево неисправностей для гипотетического случая

Примечание. 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. В первую очередь вычисляют показатели надежности элемента, затем находят критический путь и, наконец, оценивают завершающее событие.

Количественная оценка дерева осуществляется либо способом статического моделирования, либо аналитическим методом.

В первом случае дерево неисправностей моделируется на компьютере обычно для нескольких тысяч или даже миллионов циклов функционирования системы. При этом основными этапами моделирования являются:

- задание показателей надежности для элементарных событий;
- программирование модели дерева неисправностей;
- составление перечня отказов, приводящих к завершающему событию, и перечня соответствующих минимальных сечений;

- вычисление требуемых конечных результатов.

Во втором случае используют существующие аналитические методы.

7.5. Аналитический вывод для простых схем дерева отказов

Для того чтобы дерево неисправностей отвечало своему назначению, в нем используются схемы, показывающие логические связи между отказами основных элементов системы и завершающим событием. Для представления этих логических схем в математической форме применяются основные законы булевой алгебры.

Схема «ИЛИ» изображается символами U или «+». Любой из этих символов показывает объединение событий, связанных со схемой «ИЛИ». Математическое описание схемы «ИЛИ» с двумя событиями на входе дано на рис. 7.10.

Событие B_0 на выходе схемы «ИЛИ» записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 + B_2, \quad (7.4)$$

где B_1 и B_2 – события на входе.

Схема «И» изображается символом «·» или «П». Этот символ обозначает пересечение событий. Схема «И» с двумя входами показана на рис. 7.11.

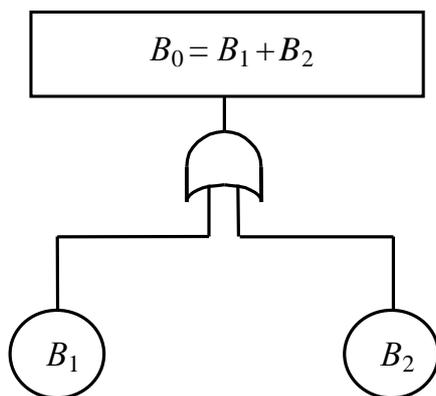


Рис. 7.10. Схема «ИЛИ» с двумя входами

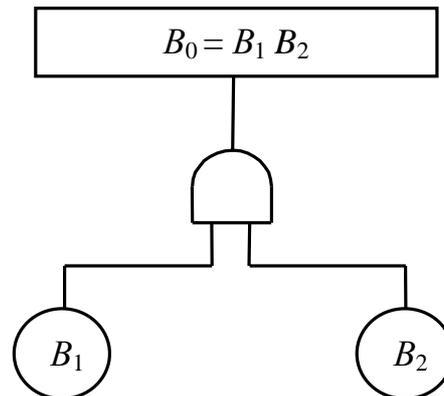


Рис. 7.11. Схема «И» с двумя входами

Событие B_0 на выходе схемы «И» записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 B_2. \quad (7.5)$$

Схема «И с приоритетом» логически эквивалентна схеме «И», но отличается от нее тем, что события на ее входе должны происходить в определенном порядке. Схема «И с приоритетом», имеющая два входа, показана на рис. 7.12. В данном случае предполагается, что событие A_1 должно наступить раньше события A_2 .

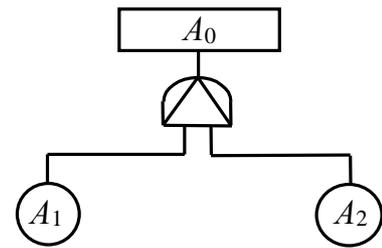


Рис. 7.12. Схема «И с приоритетом» с двумя входами

7.6. Дерево с повторяющимися событиями

Характерная конфигурация такого дерева неисправностей показана на рис. 7.13.

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

$$\begin{aligned} T &= C B_3, & B_1 &= A_1 + A_2, \\ B_3 &= B_1 B_2, & B_2 &= A_1 + A_3. \end{aligned}$$

Подставляя в первое выражение соотношения для B_1 , B_2 и B_3 , получаем

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

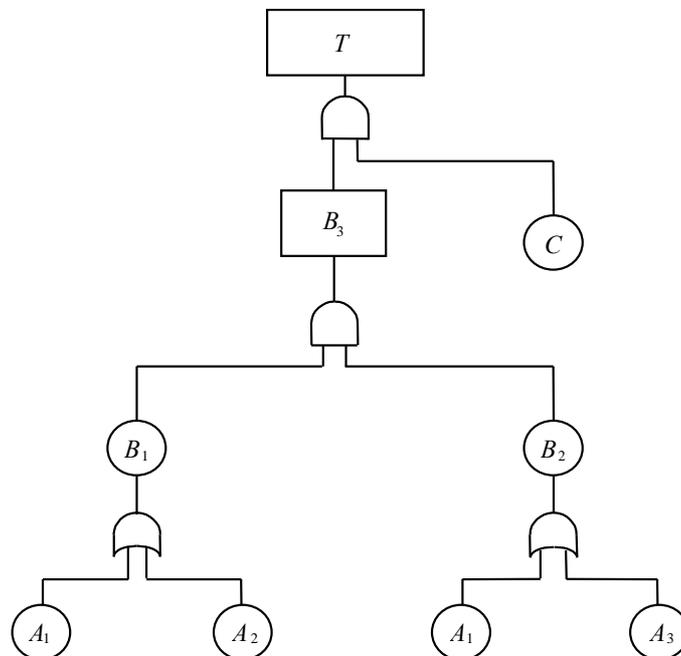


Рис. 7.13. Дерево отказов в случае повторяющихся событий: A_1 , A_2 , A_3 и C – элементарные события; B_1 , B_2 , B_3 – промежуточные события; T – завершающее событие

Из рис. 7.13 видно, что отказ A_1 является повторяющимся элементарным событием, поэтому полученное выражение необходимо упростить, используя распределительный закон булевой алгебры.

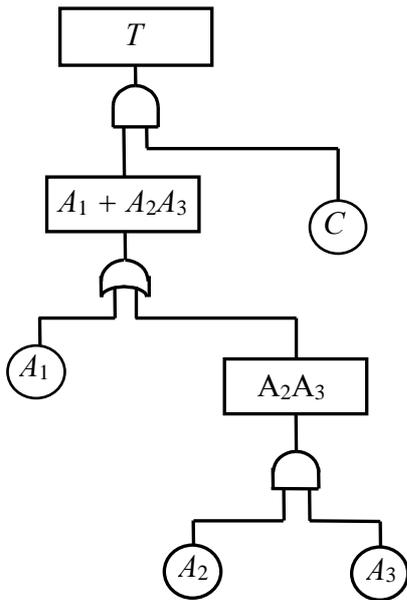


Рис. 7.14. Упрощенное дерево неисправностей

В результате получаем $T = C [A_1 + A_2 A_3]$, и первоначальное дерево неисправностей (см. рис. 7.13) принимает вид, показанный на рис. 7.14.

Таким образом, прежде чем находить количественные показатели надежности и риска, целесообразно упростить выражения с повторяющимися событиями, используя свойства булевой алгебры.

7.7. Вероятностная оценка дерева отказов

Схема «ИЛИ». Для пояснения вероятностного аспекта работы этой схемы проанализируем схему «ИЛИ» с двумя входами, изображенную на рис. 7.15. Для этой схемы вероятность появления завершающего события имеет вид

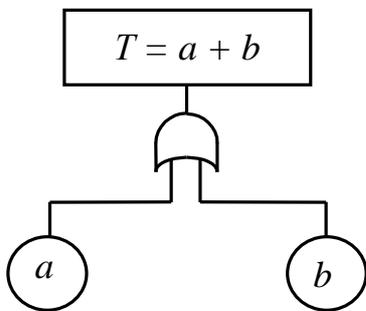


Рис. 7.15. Схема «ИЛИ» с двумя входами

ет вид

$$P(T) = P(a) + P(b) - P(a b). \quad (7.6)$$

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

$$P(T) \approx P(a) + P(b). \quad (7.7)$$

В случае схемы «ИЛИ» с n входами имеем

$$P(a + b + c + \dots + n) \approx P(a) + P(b) + P(c) + \dots + P(n). \quad (7.8)$$

Это приближенное выражение дает хорошие результаты, если вероятности появления элементарных событий $P(a)$, $P(b)$, $P(c)$, ... , $P(n)$ очень малы, и точный результат, если события a , b , c , ... , n являются несовместными.

Схема «И». В случае схемы «И» с двумя входами (рис. 7.16) события a и b статистически независимы, и для получения вероятности появления завершающего события применяется правило умножения вероятностей:

$$P(ab) = P(a) P(b). \quad (7.9)$$

Для схемы «И» с n входами данное выражение можно записать в общем виде:

$$P(abc \dots n) = P(a) P(b) P(c) \dots P(n). \quad (7.10)$$

Пример 8. Требуется вычислить вероятность появления завершающего события гипотетического дерева неисправностей, изображенного на рис. 7.17.

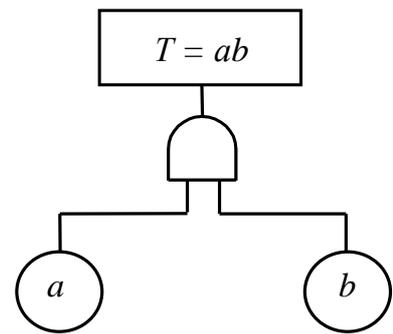


Рис. 7.16. Схема «И» с двумя входами

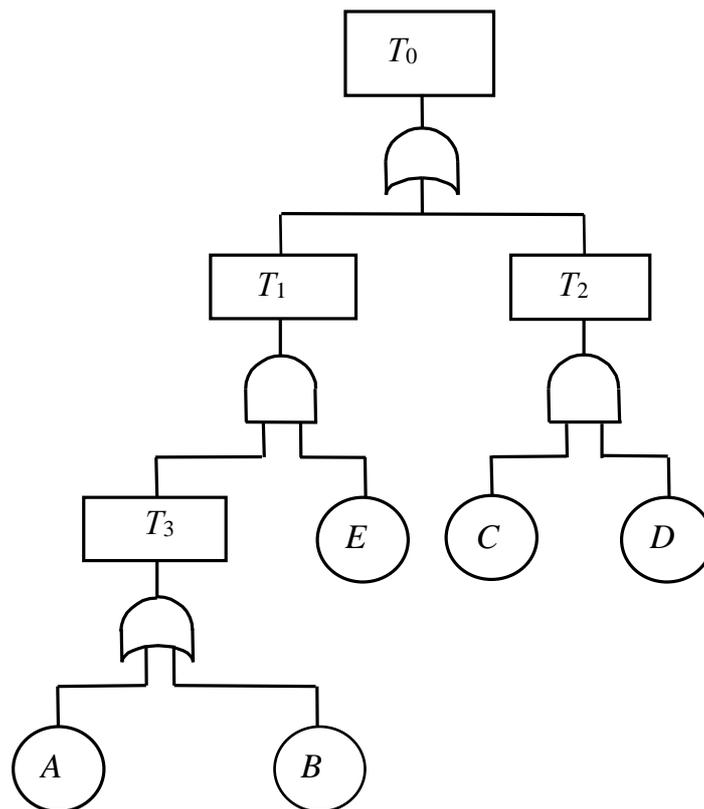


Рис. 7.17. Гипотетическое дерево событий

Допустим, что основные события A , B , C , D и E статистически независимы и что $P(A) = P(B) = P(C) = P(D) = P(E) = 1/5$. 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 двумя методами.

Метод 1. Запишем выражение для завершающего события через элементарные события, т. е.

$$T_0 = T_1 + T_2.$$

Поскольку $T_2 = CD$, $T_1 = T_3E$, $T_3 = A + B$, то $T_0 = E(A + B) + CD$, и, следовательно,

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

Раскрывая данное выражение, можно получить формулу для вероятности появления завершающего события. При допущении статистической независимости событий (отказов) можно найти количественную оценку вероятности появления завершающего события.

Метод 2 – 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:

$$P(T_3) = P(A) + P(B) - P(A)P(B) = 1/5 + 1/5 - 1/25 = 9/25,$$

$$P(T_2) = P(C)P(D) = 1/5 \cdot 1/5 = 1/25,$$

$$P(T_1) = P(T_3)P(E) = 9/25 \cdot 1/5 = 9/125,$$

$$P(T_0) = P(T_1) + P(T_2) - P(T_1)P(T_2) = 9/125 + 1/25 - 9/125 \cdot 1/25 = 341/3125.$$

Пример 9. Допустим, что в дереве неисправностей, изображенном на рис. 7.17, событие E заменяется событием D (рис. 7.18). Для

получения вероятности появления завершающего события нового дерева, изображенного на рис. 7.18, применим *метод 1* из предыдущего примера. Выражение, связывающее завершающее событие с основными событиями (включая повторяющееся событие D), имеет вид

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

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

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

Следовательно, вероятность появления завершающего события равна

$$P(DA + BD + CD) = 1/25 + 1/25 + 1/25 - 1/125 - 1/125 - 1/125 + 1/625 = 61/625.$$

Однако если вначале исключаются повторяющиеся события, то дерево неисправностей, представленное на рис. 7.18, приводится к дереву, показанному на рис. 7.19. Выражение для завершающего события этого дерева неисправностей принимает вид

$$T_0 = DT_1, \quad \text{где} \quad T_1 = A + B + C.$$

В случае статистически независимых событий вероятность появления завершающего события равна

$$P(DT_1) = P(D)P(T_1) = 1/5 \cdot 61/625 = 61/3125,$$

где $P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A)P(B) - P(A)P(C) - P(B)P(C) + P(A)P(B)P(C) = 61/625$.

Заметим, что, если вероятности появления элементарных отказов очень малы, существование зависимости событий не вносит большой погрешности в конечный результат. Однако, прежде чем находить окончательное значение вероятности, необходимо попытаться исключить все случаи зависимости событий в дереве неисправностей.

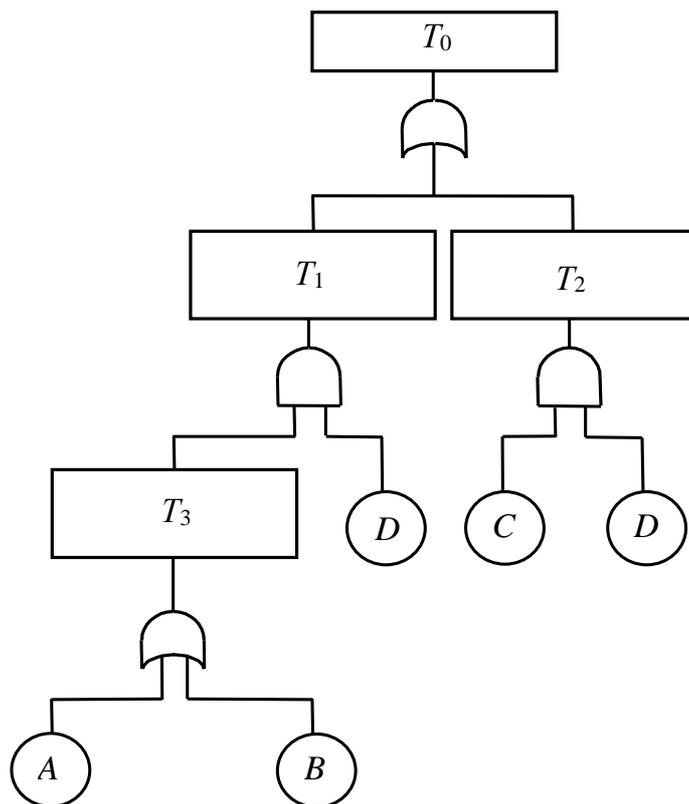


Рис. 7.18. Дерево неисправностей в случае повторяющегося события

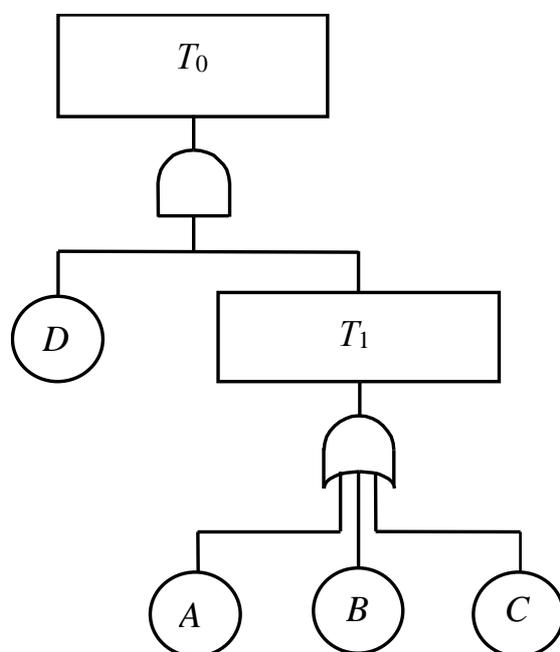


Рис. 7.19. Дерево неисправностей при отсутствии повторяющихся событий

7.8. Преимущества и недостатки метода дерева отказов

Данный метод, как и любой другой, обладает определенными достоинствами и недостатками. Так, например, метод дает полное представление о поведении технической системы, но требует от специалистов по надежности глубокого понимания работы технической 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 анализы надежности; облегчает анализ надежности сложных систем. Вместе с тем реализация метода требует значительных затрат средств и времени. Кроме того, полученные результаты трудно проверить; трудно учесть состояния частичного отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа. Существенные трудности возникают и при получении в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащих резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов.

Контрольные вопросы

1. Какие символы используются при построении деревьев событий и деревьев отказов?
2. В чем состоит процедура построения дерева отказов?
3. В чем заключается сущность метода первичных отказов?
4. В чем заключается сущность метода вторичных отказов?
5. В чем заключается сущность метода инициированных отказов?
6. Что такое «минимальное сечение дерева неисправностей»?
7. Как проводится количественная оценка дерева отказов?
8. Каковы преимущества и недостатки метода дерева отказов?

Глава 8. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РИСКА ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ

8.1. Критерии приемлемого риска

До недавнего времени нормативы безопасности во всем мире основывались на концепции абсолютной безопасности. Для предотвращения аварий внедрялись инженерные системы безопасности, принимались организационные меры, обеспечивающие высокий уровень дисциплины, строгий регламент работы. Считалось, что такой подход позволяет исключить любую опасность для населения и окружающей среды.

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.

Ресурсы любого общества ограничены. А расходы на повышение безопасности растут экспоненциально, то есть каждый следующий шаг по направлению повышения безопасности обходится обществу всё дороже и дороже. Поэтому пришли к пониманию невозможности создания абсолютной безопасности (нулевого риска). Стремиться следует к достижению такого уровня риска от воздействия опасных факторов, который можно рассматривать как «приемлемый». Его приемлемость должна быть обоснована исходя из экономических и социальных соображений. Необходимость формирования концепции приемлемого (допустимого) риска обусловлена невозможностью создания абсолютно безопасной деятельности (технологического процесса).

Приемлемый риск – риск гибели человека, который общество на данном этапе развития готово принять.

Во всех развитых в промышленном отношении странах существует устойчивая тенденция применения концепции приемлемого риска.

Среди подходов, предложенных для обоснования критериальных значений риска, следует отметить метод экономического анализа безопасности, основанный на учете затрат на обеспечение безопасности и потерь от возможных аварий. Концепция нормирования безопасности предлагает задание риска следующим образом:

- абсолютную безопасность невозможно обеспечить, объект может быть только относительно безопасен;

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

- риск определяется путем выявления различных факторов, влияющих на безопасность, и их количественной оценки.

Существуют и другие аспекты нормирования безопасности:

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

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

- не должно быть составляющих риска, резко превышающих другие составляющие (аналог принципа равнонадежности, применяемого при обеспечении надежности изделий).

Поэтому при оценке приемлемости различных уровней риска можно ограничиться рассмотрением риска лишь тех вредных последствий, которые в конечном счете приводят к смертельным исходам, поскольку для этого показателя существуют достаточно надежные статистические данные. Тогда, например, понятие «экологический риск» может быть сформулировано как отношение величины возможного ущерба, выраженного в количестве 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.

Общественная приемлемость риска связана с различными видами деятельности и определяется экономическими, социальными и психологическими факторами.

В общем случае под приемлемым риском понимается риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из экономических и социальных соображений.

Пример определения приемлемого риска представлен на рис. 8.1.

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

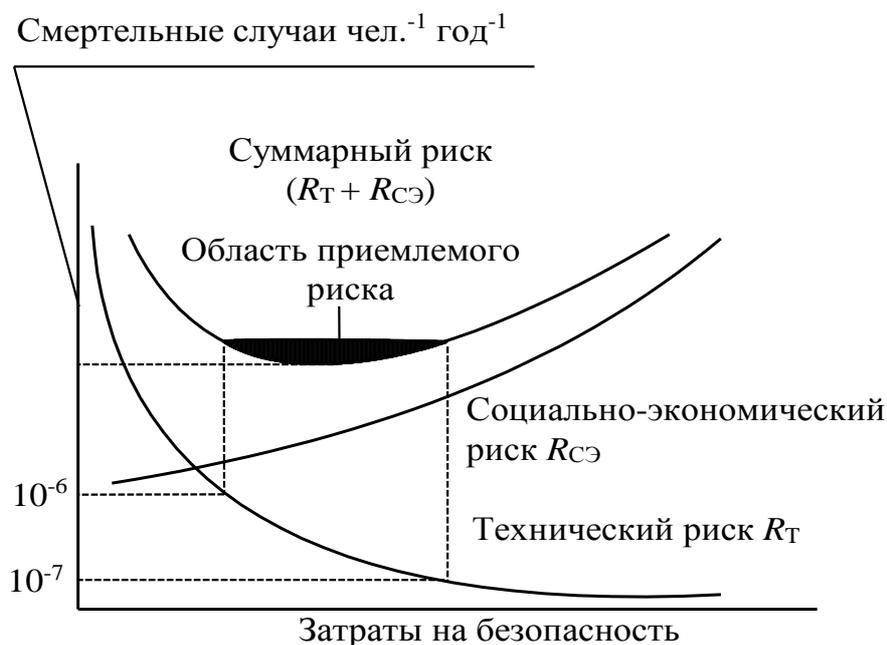


Рис. 8.1. Определение приемлемого риска

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:

$$R_d = 10^{-5} \text{ ЛИ}/(\text{чел.}\cdot\text{год}); \quad R_d = 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ НС}/(\text{чел.}\cdot\text{год}),$$

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} – 10^{-6} (смертельных случаев чел⁻¹·год⁻¹), а величина 10^{-6} является максимально приемлемым уровнем индивидуального риска. В национальных правилах эта величина используется для оценки пожарной и радиационной безопасности.

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т. е. можно говорить о снижении индивидуального, технического или экологического риска, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить и каким в результате окажется социальный риск.

В связи со сложностью расчетов показателей риска, недостатком исходных данных (особенно по надежности оборудования, человеческим ошибкам) на практике часто 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.

Таким образом, основные требования к выбору критерия приемлемого риска при проведении анализа риска – обоснованность и определенность.

8.2. 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 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 и продолжительности жизни. В них оговариваются как интересы групп населения, так и каждого человека при защите от чрезмерного риска.

Важнейшим принципом является положение о том, что в управление риском должен быть включен весь спектр существующих в обществе опасностей, и общий риск от них для любого человека и для общества в целом не может превышать «приемлемый» уровень.

Схема процесса управления риском представлена на рис. 8.2.

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

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

- сведения о предполагаемых направлениях хозяйственной деятельности, проектах и технических решениях, которые могут влиять на уровень техногенной и экологической безопасности, а также программы для вероятностной оценки связанного с ними риска;

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

- разработка технико-экономической стратегии увеличения безопасности и определение оптимальной структуры затрат для управления величиной риска и ее снижения до приемлемого уровня с экономической и экологической точек зрения;
- формирование организационных структур, экспертных систем и нормативных документов, предназначенных для выполнения указанных функций и процедуры принятия решений;
- воздействие на общественное мнение и пропаганда научных данных об уровнях техногенного и экологического рисков с целью ориентации на объективные оценки риска.

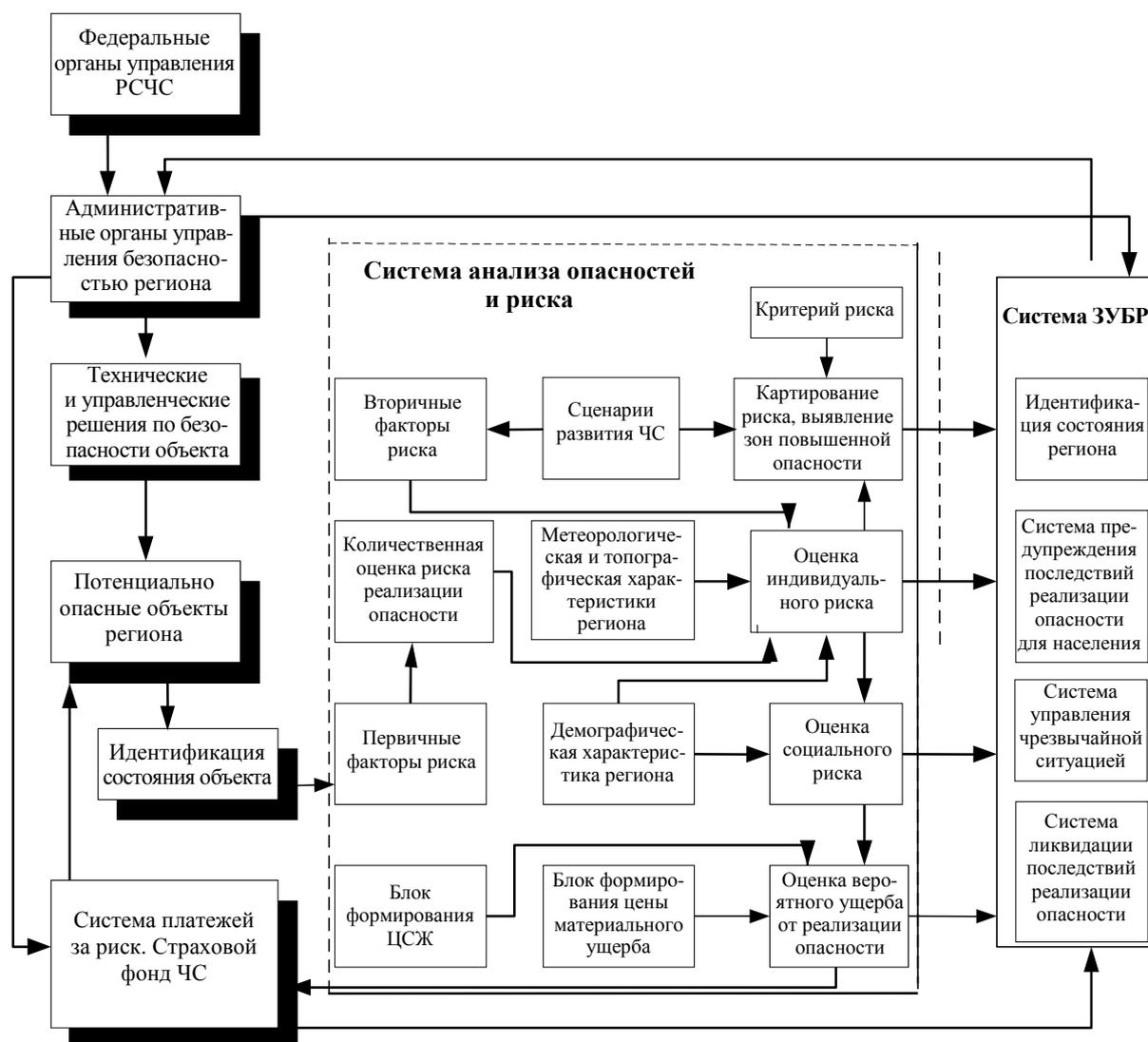


Рис. 8.2. Схема управления риском

Модель управления риском состоит из четырех частей и этапов.

Первый этап связан с характеристикой риска. На начальном этапе проводится сравнительная характеристика рисков с целью установления приоритетов. На завершающей фазе оценки риска устанавливается степень опасности (вредности).

Второй этап – определение приемлемости риска. Риск сопоставляется с рядом социально-экономических факторов:

- выгоды от того или иного вида хозяйственной деятельности;
- потери, обусловленные данным видом деятельности;
- 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 заключается в выборе одной из «типовых» мер, способствующей уменьшению (в первом и во втором случае) или устранению (в третьем случае) риска.

Четвертый этап – принятие регулирующего решения – определение нормативных актов (законов, постановлений, инструкций) и их положений, соответствующих реализации той «типовой» меры, которая была установлена на предшествующей стадии. Данный элемент, завершая процесс управления риском, одновременно увязывает все его стадии, а также стадии оценки риска в единый процесс принятия решений, единую концепцию риска.

8.3. Применение теории риска в технических системах

Проектирование сложных технических систем и конструкций выполняется на основе численных методов с использованием компьютеров. Однако вычисленные на основе таких расчетов параметры и характеристики 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. 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 обеспечение одинаковой степени риска.

При решении многих инженерных задач приходится определять риск, который возникает как результат снижения затрат при произ-

водстве и эксплуатации технической системы. 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 технической системы и увеличению ожидаемой выгоды. Но вместе с тем это повышение может повлечь за собой разрушение технической системы в более короткий срок или с большей долей вероятности. Поэтому определение принимаемой величины риска – весьма ответственная задача, которая может быть правильно решена только путем проведения глубокого статистического анализа.

Функциональная зависимость между величиной риска и ожидаемой выгодой выражается нелинейным законом, как это показано на рис. 8.3.

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.

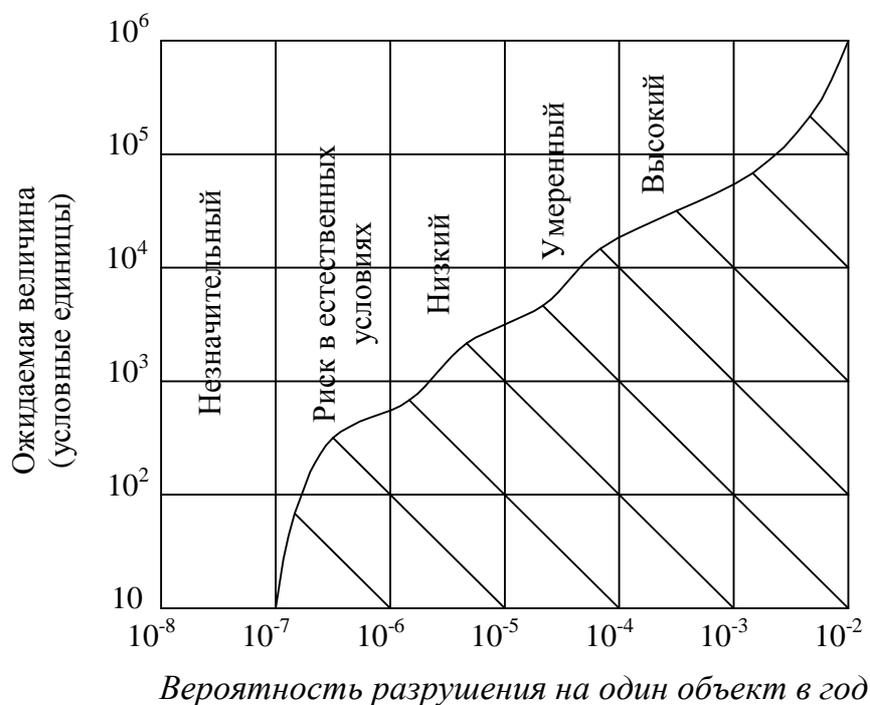


Рис. 8.3. Зависимость величины риска от затрат

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. Так, риск в автомобильных авариях в Российской Федерации достигает уровня $2 \cdot 10^{-4}$. Уровень риска 10^{-5} соответствует естественным случайным событиям, 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 технической системы 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 различную вероятность.

Коэффициент надежности вычисляется для каждой намеченной схемы разрушения по формуле

$$F_{rf} = \prod_{i=1}^n (R_i), \quad (8.1)$$

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

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

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)^{m_j}, \quad (8.2)$$

где m_j – число участков для выбранной схемы разрушения.

Решая технические задачи, необходимо учитывать риск, возникающий в результате неопределенностей при выборе исходных данных для расчетов. При определении допустимого риска необходимо учитывать вероятность благоприятного и неблагоприятного результатов при эксплуатации проектируемой технической системы. Величина риска находится на основе общих математических методов: теории вероятностей, математической статистики и теории игр. Для измерения величины риска, соответствующего данному варианту решения, проектировщик должен исследовать воздействие всех влияющих факторов. Особое значение приобретает определение риска при проектировании новых сооружений и сложных технических систем. Правильное использование теории риска очень часто приводит к тому, что проектируемая техническая система может обойтись дешевле.

Очень часто понятие риска связывают с оценкой возможного ущерба. Для правильного понимания существа вопроса целесообразно определять риск как возможность отклонения принятого решения от той величины, которая соответствует оптимальным условиям эксплуатации объекта.

Затраты на производство технических систем связаны с принятой при проектировании величиной риска. При большом риске снижается стоимость первоначальных затрат, однако в дальнейшем при неблагоприятном стечении обстоятельств в технической системе могут возникнуть повреждения, ликвидация которых связана с дополнительными расходами. Малая величина риска, принятая при проекти-

ровании, потребует увеличения прочности и надежности элементов технической системы, а это повышает стоимость ее производства. Если в процессе дальнейшей эксплуатации не произойдет неблагоприятного стечения обстоятельств, то первоначальное удорожание производства технической системы для увеличения прочности и надежности ее элементов оказывается не нужным. Таким образом, увеличение риска приводит к удешевлению производства, а снижение риска вызывает его удорожание.

8.4. 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. 8.1) 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. взрыв будет сопровождаться пожаром, отравлением персонала и загрязнением ОПС.

Таблица 8.1

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	3,10	0	0
Неисправность оборудования	58	25,66	6	31,58
НПУЭ:				
- электрооборудования	17	7,52	3	15,78
- печей	1	0,44	0	0
- теплогенерирующих установок	0	0	0	0
- бытовых газовых устройств	0	0	0	0
НППБ электрогазовых работ	25	11,06	0	0
<i>Взрывы</i>	1	0,44	0	0
Самовозгорание веществ и материалов	6	2,65	0	0
Неосторожное обращение с огнем	86	38,05	9	47,37
<i>Грозовые разряды</i>	1	0,44	9	0
<i>Неустановленные</i>	6	2,65	1	5,26
Прочие	18	7,96	0	0

Примечание. НПУЭ – нарушение правил устройства и эксплуатации; НППБ – нарушение правил пожарной безопасности.

В свою очередь, пожар может привести к взрыву и последующему воздействию на персонал и ОПС. Загрязнение среды светлыми нефтепродуктами (СНП) – бензином и керосином – в ряде случаев может сопровождаться взрывом и пожаром. В табл. 8.2 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 эксперту информацию. Работа с априорной информацией представляет особую разновидность вероятностных процедур, включая субъективные (персональные) вероятности.

Таблица 8.2

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	В, П, О, З	В, П, О, З	В, П, О, З		
Перекачка СНП						
Хранение СНП				В, П, О, З		
Ремонт резервуаров				В, О		
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 – продуктивно-насосная станция; ТТ – технологический трубопровод (для перекачки СНП); РП – резервуарный парк; Л – лаборатория; ПХ – помещения для хранения СНП, отобранных для анализа.

Для определения вероятности наступления неблагоприятного события, например взрыва Q_6 , надо знать вероятности исходных событий – образование парогазовой смеси $Q_{2.1}$ и появление 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 табл. 8.3.

Анализ специфических свойств керосина разных марок и бензинов показал отсутствие у них принципиальных различий. Оба они являются легковоспламеняющимися жидкостями (ЛВЖ), но упругость паров бензина значительно (в среднем на 1 – 2 порядка) выше упругости паров керосина. Поэтому в условиях производства при нормальной температуре в закрытых объемах бензин может образовывать паровоздушные смеси, способные к взрыву от внешних источников, в то время как керосин практически их не образует.

Таблица 8.3

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	0,10	0,10
Объемное электрическое сопротивление	0,06	0,06
Особо опасные характеристики	0	0

Коэффициент K_1 , имеющий достаточно высокое значение (0,41), можно связать с вероятностной составляющей, принимая субъективную вероятность образования паровоздушной смеси бензина, близкой к 0,4. Что касается керосина, то эта величина в значительной мере зависит от его состава. Для авиационных топлив она приближается к 0,4, а для осветительного керосина может быть принята на порядок ниже, т. е. 0,04.

Статистика пожаров и взрывов свидетельствует о том, что источники воспламенения проявляются достаточно часто. Поэтому на этапе оценки опасности можно принять субъективную вероятность появления источника зажигания (воспламенения) $Q_{2.2}$ равной 0,4 (такой же, как $Q_{3.13} = 0,40$). В этом случае для модели оценки вероятности взрыва бензина он составит $0,4 \cdot 0,4 = 0,16$. Иначе говоря, один случай из шести может закончиться взрывом. Для осветительного керосина эта величина на порядок меньше (0,016), т. е. только 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 токо-

ведущих частей. Вероятности проявления других источников воспламенения следующие: атмосферное электричество (молния, грозовые разряды): $Q_{3.10} = 0,05$; разряд статического электричества: $Q_{3.11} = 0,09$; тлеющее пламя (транспорт): $Q_{3.12} = 0,02$; открытое пламя (неосторожное обращение с огнем): $Q_{3.13} = 0,40$; другие источники: $Q_{3.14} = 0,10$. Составляющие вероятности более низкого уровня на данном этапе не анализируются.

Для анализа риска применительно к опасным факторам «Взрыв» и «Пожар» использовали данные о 226 пожарах на складах ЛВЖ и ГЖ, имевших в качестве источника загорания ЛВЖ. Эти пожары сопровождалась гибелью 19 человек. Отсюда можно в первом приближении определить, что один погибший приходится на 12 пожаров. Считая, что вероятность взрывов и пожаров с участием бензина равна 0,16, получаем вероятность смертельного травмирования, равную 0,013.

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. Важное средство предотвращения аварий в данном случае – четкое соблюдение отраслевых правил, норм и инструкций.

Контрольные вопросы

1. Каким образом определяются критерии приемлемого риска?
2. В чем заключается процесс управления риском?
3. Какая существует зависимость между величиной риска и ожидаемой выгодой?
4. Какова взаимосвязь между затратами на производство технических систем с принятой при проектировании величиной риска?
5. В чем состоит анализ условий возникновения и развития аварий?
6. Какими могут быть причины ошибок персонала?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание учебного пособия соответствует образовательному стандарту по дисциплине «Надежность технических систем и техногенный риск» для направления «Техносферная безопасность». С целью ограничения объема пособия материалы ряда глав даны в сокращенном виде. С другой стороны, более подробно были рассмотрены отдельные вопросы, например основы теории вероятности.

Задача развития дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск» может быть сформулирована следующим образом. Необходимо разработать учебные пособия, детально описывающие методы анализа риска, в том числе основные и дополнительные из числа определенных стандартами.

К сожалению, некоторые стандарты России имеют статус «отменен». Несмотря на это, приведенные в них методики расчета надежности и риска, используемые также в других странах, например западноевропейских, востребованы и постоянно развиваются.

Автор рекомендует более пристальное внимание уделить вопросам, связанным с управлением рисками – целям и основным этапам анализа риска и методам анализа риска, особенно анализу деревьев событий и неисправностей, как наиболее информативным и трудоемким.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветошкин, А. Г. Надежность и безопасность технических систем : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин, В. И. Марунин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – 129 с.

2. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2003. – 479 с. – ISBN 5-06-004212-X.

3. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения // Надежность в технике : сборник. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 24 с.

4. Животкевич, И. Н. Надежность технических изделий / И. Н. Животкевич, А. П. Смирнов. – М. : Ин-т испытаний и сертификации вооружений и военной техники, 2004. – 472 с. – ISBN 5-98040-003-6.

5. Корчагин, А. Б. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 : Основы теории / А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 228 с. – ISBN 978-5-8149-1066-0. – ISBN 978-5-8149-1067-7 (ч. 1).

6. Надежность технических систем : конспект лекций и сб. задач к практ. занятиям / сост. В. А. Дмитриев ; Сам. гос. техн. ун-т. – Самара, 2008. – 100 с.

7. Штриплинг, Л. О. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Л. О. Штриплинг. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – 108 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	5
1.1. Надежность как комплексное свойство технических систем	5
1.2. Классификация и характеристики отказов	7
1.3. Показатели надежности технических систем	11
Контрольные вопросы	24
Глава 2. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВ ТЕОРИИ ВЕРоятНОСТЕЙ	25
2.1. Случайные события	25
2.1.1. Алгебра событий	25
2.1.2. Классическое определение вероятности	27
2.1.3. Основные формулы комбинаторики	28
2.1.4. Непосредственный подсчет вероятностей	30
2.1.5. Условная вероятность. Теорема умножения вероятностей	31
2.1.6. Теорема сложения вероятностей	32
2.1.7. Формула полной вероятности	33
2.1.8. Вычисление вероятностей гипотез после испытания (формула Байеса)	34
2.1.9. Повторные независимые испытания (формула Бернулли)	35
2.1.10. Формула Пуассона	37
2.2. Случайные величины	37
2.2.1. Виды случайных величин	37
2.2.2. Законы распределения случайной величины.....	39
2.2.3. Функция распределения вероятности случайной величины	39
2.2.4. Плотность распределения вероятности непрерывной случайной величины	42
2.2.5. Числовые характеристики случайных величин	43
Контрольные вопросы и задачи	46

Глава 3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТА	48
3.1. Теория надежности и законы распределения случайных величин	48
3.2. Надежность в период нормальной эксплуатации	49
3.3. Надежность в период постепенных отказов	51
3.3.1. Закон нормального распределения	52
3.3.2. Логарифмически нормальное распределение	55
3.3.3. Распределение Вейбулла	55
3.4. Совместное действие внезапных и постепенных отказов	57
Контрольные вопросы и задачи	57
Глава 4. СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	58
4.1. Структурная схема надежности технической системы	58
4.2. Расчёт надёжности систем с последовательным соединением элементов	62
4.3. Расчёт надёжности системы с параллельным соединением элементов	63
4.4. Анализ сложных систем	64
4.5. Расчёт структурной надёжности систем	67
Контрольные вопросы и задачи	68
Глава 5. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	69
5.1. Резервирование	69
5.2. Кратность резервирования и основные расчетные формулы	73
5.3. Особенности расчета надежности систем с нагруженным и ненагруженным резервированием	82
Контрольные вопросы	88
Глава 6. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РИСКА	89
6.1. Понятие риска	89
6.2. Классификация видов риска	93
6.3. Методология анализа и оценки риска	96
6.4. Качественные методы анализа риска	101
6.5. Количественная оценка риска	105
Контрольные вопросы	109

Глава 7. ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКА	110
7.1. Определения и символы, используемые при построении деревьев	110
7.2. Анализ деревьев отказов	112
7.3. Построение дерева отказов	114
7.4. Качественная и количественная оценка дерева отказов	123
7.5. Аналитический вывод простых схем дерева отказов	125
7.6. Дерево с повторяющимися событиями	126
7.7. Вероятностная оценка дерева отказов	127
7.8. Преимущества и недостатки метода дерева отказов	132
Контрольные вопросы	132
Глава 8. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РИСКА ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ	133
8.1. Критерии приемлемого риска	133
8.2. Управление риском	137
8.3. Применение теории риска в технических системах	140
8.4. Оценка риска аварий	144
Контрольные вопросы	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	150

Учебное издание

КИНДЕЕВ Евгений Александрович

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК

Учебное пособие

Редактор А. А. Амирсейидова
Технический редактор С. Ш. Абдуллаева
Корректор Е. С. Глазкова
Компьютерная верстка Ш. Ш. Амирсейидова

Подписано в печать 31.08.16.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 9,07. Тираж 60 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.