

Министерство образования и науки Российской Федерации
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

Р.А. ШУБИН

НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК

*Утверждено Учёным советом университета
в качестве учебного пособия для студентов 3, 4 курсов
дневного отделения специальности
280102 «Безопасность технологических процессов и производств»*



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2012

УДК 681.518
ББК 381я73-5
Ш951

Р е ц е н з е н т ы:

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технология продовольственных продуктов» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
В.А. Пронин

Кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и фармакология»
Медицинского института ФГБОУ ВПО «ТГУ им. Г.Р. Державина»
С.Е. Синютина

Шубин, Р.А.

Ш951 Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.

Рассмотрены основные положения теории надёжности технических систем и техногенного риска, элементы физики отказов, структурные схемы надёжности технических систем и их расчёт. Приведены методологии анализа и оценки техногенного риска.

Предназначено для студентов 3 и 4 курсов дневного обучения специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств».

УДК 681.518
ББК 381я73-5

ISBN 978-5-8265-1086-5

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2012

ВВЕДЕНИЕ

В современном обществе промышленное производство играет важную роль по удовлетворению материальных и духовных потребностей, что влечёт за собой увеличение масштабов производства. В результате чего промышленное производство стало постоянным источником возникновения несчастных случаев, аварий и катастроф. В наибольшей степени аварийность свойственна угольной, горнорудной, химической, нефтегазовой и металлургической отраслям промышленности, транспорту. Проблема предупреждения происшествий приобретает особую актуальность в атомной энергетике, химической промышленности, при эксплуатации военной техники, где используются и обращаются мощные источники энергии, высокотоксичные и агрессивные вещества.

Решение проблемы обеспечения безопасности развития общества связано в том числе и с развитием теории надёжности технологического оборудования и оценка рисков производства. В настоящем учебном пособии рассмотрена концепция надёжности технических систем и производственной безопасности как составной части техногенной безопасности. Приведены основные термины и определения надёжности технических систем, указаны основные опасности технических систем.

Рассмотрены основные положения теории надёжности технических систем и техногенного риска. Приведены математические формулировки, используемые при оценке и расчёте основных свойств и параметров надёжности технических объектов, рассмотрены элементы физики отказов, структурные схемы надёжности технических систем и их расчёт.

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

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

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

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

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

При изучении вопросов надёжности рассматривают самые разнообразные объекты – изделия, сооружения, системы с их подсистемами. Надёжность изделия зависит от надёжности его элементов, и чем выше их надёжность, тем выше надёжность всего изделия.

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

Надёжность объекта является *комплексным свойством*, её оценивают по четырём 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.

Показатели безотказности:

- *вероятность безотказной работы* – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает;
- *средняя наработка до отказа* – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа;
- *средняя наработка на отказ* – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки;
- *интенсивность отказов* – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Этот показатель относится к невосстанавливаемым изделиям.

Показатели долговечности

Количественные показатели долговечности восстанавливаемых изделий делятся на две группы.

1. Показатели, связанные со сроком службы изделия:

- *срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или её возобновление после ремонта до перехода в предельное состояние;
- *средний срок службы* – математическое ожидание срока службы;
- *срок службы до первого капитального ремонта агрегата или узла* – это продолжительность эксплуатации до ремонта, выполняемого для восстановления исправности и полного или близкого к полному восстановления ресурса изделия с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые;
- *срок службы между капитальными ремонтами*, зависящий преимущественно от качества ремонта, т.е. от того, в какой степени восстановлен их ресурс;
- *суммарный срок службы* – это календарная продолжительность работы технической системы от начала эксплуатации до выбраковки с учётом 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* – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновление после ремонта до перехода в предельное состояние;

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

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

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

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

2. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ

2.1. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПУАССОНА

Закон распределения Пуассона описывает закономерность появления случайных отказов в сложных системах. Этот закон нашёл широкое применение при определении вероятности появления и восстановления отказов.

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

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda},$$

где λ – параметр распределения (некоторая положительная величина); $m = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ математическое ожидание M_x и дисперсия D_x случайной величины X для закона Пуассона равны параметру распределения λ :

$$M_x = D_x = \lambda.$$

Распределение Пуассона является однопараметрическим с параметром λ .

2.2. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

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

Приведём примеры неблагоприятного сочетания условий работы деталей машин, вызывающих их внезапный отказ. Для зубчатой передачи это может быть действием максимальной нагрузки на наиболее слабый зуб при его зацеплении; для элементов радиоэлектронной аппаратуры – превышение допустимого тока или температурного режима. Плотность распределения экспоненциального закона (рис. 1) описывается соотношением

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

функция распределения этого закона – соотношением

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

функция надёжности

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

математическое ожидание случайной величины X

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

дисперсия случайной величины X

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

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

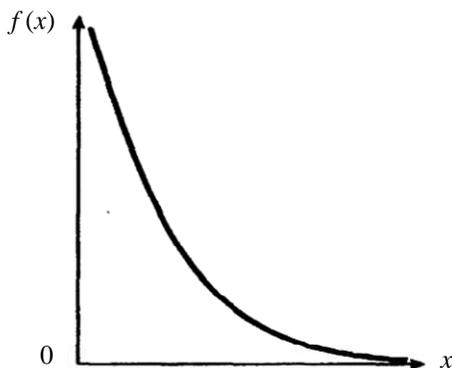


Рис. 1. График плотности экспоненциального распределения

2.3. НОРМАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

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

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

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

Нормальный закон распределения описывается следующей зависимостью:

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

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

Кривая плотности распределения приведена на рис. 2.

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

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

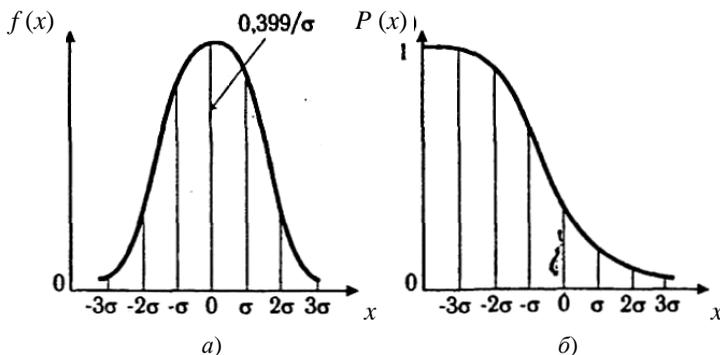


Рис. 2. Кривые плотности вероятности (а) и функции надёжности (б) нормального распределения

параметр σ – среднее квадратическое отклонение случайной величины X , оцениваемое по формуле

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

вероятность отказа и вероятность безотказной работы

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

соответственно $Q(x) = F(x)$, $P(x) = 1 - F(x)$.

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

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

Величина t является центрированной (так как $M_t = 0$) и нормированной (так как $\sigma_t = 1$). Функция распределения соответственно запишется в виде:

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

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

2.4. ЛОГАРИФИЧЕСКИ НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Логарифмически нормальное распределение применяют для описания наработки до отказа подшипников, электронных ламп и других изделий.

Неотрицательная случайная величина распределена *логарифмически нормально*, если её логарифм распределён нормально. Плотность распределения для различных значений σ приведена на рис. 3.

Плотность распределения описывается зависимостью

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

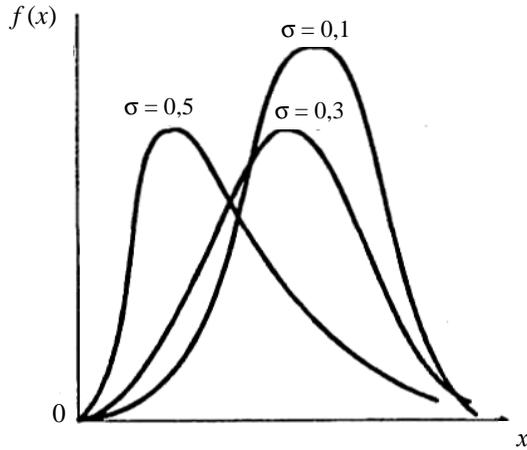


Рис. 3. Плотность логарифмически нормального распределения

где M и σ – параметры, оцениваемые по результатам n испытаний:

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

Для логарифмически нормального закона распределения функция надёжности выглядит так:

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

Вероятность безотказной работы можно определить по таблицам для нормального распределения приложения

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

Математическое ожидание наработки до отказа

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

Среднее квадратическое отклонение

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

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

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

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

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

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

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

$$M_x = x_0 e^{2,65\sigma^2};$$

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

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

2.5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЙБУЛЛА

Закон Вейбулла представляет собой двухпараметрическое распределение. Этот закон является универсальным, так как при соответствующих значениях параметров превращается в нормальное, экспоненциальное и другие виды распределений. Автор данного закона использовал его при описании экспериментально наблюдавшихся разбросов усталостной прочности стали, пределов её упругости. Закон Вейбулла удовлетворительно описывает наработку до отказа подшипников, элементов радиоэлектронной аппаратуры, его используют для оценки надёжности деталей и узлов машин, в частности автомобилей, а также для оценки надёжности машин в процессе их приработки. Плотность распределения описывается зависимостью, график приведён на рис. 4.

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

где α – параметр формы кривой распределения; λ – параметр масштаба.

Функция надёжности для этого закона:

$$P(x) = \exp(-\lambda x^\alpha),$$
$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x^\alpha).$$

Математическое ожидание случайной величины X равно

$$M_x = \Gamma(1+1/\alpha)\lambda^{-1/2},$$

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

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция для непрерывных значений x .

Дисперсия случайной величины X равна

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

Широкое применение закона распределения Вейбулла объясняется тем, что этот закон, обобщая экспоненциальное распределение, содержит дополнительный параметр α . Подбирая нужным образом параметры α и λ , можно получить лучшее соответствие расчётных значений опытным данным по сравнению с экспоненциальным законом, который является однопараметрическим (параметр λ).

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

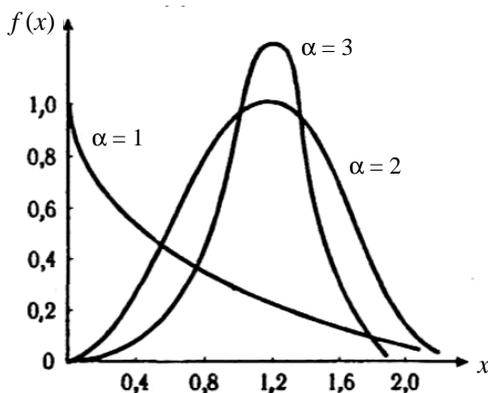


Рис. 4. Плотность распределения Вейбулла для $\lambda = 1$

Наоборот, если изделие хорошо контролируется при изготовлении и почти не имеет скрытых дефектов, но подвергается быстрому старению, то функция надёжности описывается законом Вейбулла с параметром $\alpha > 1$. При $\alpha = 3,3$ распределение Вейбулла близко к нормальному.

Контрольные вопросы

1. Перечислить модели распределения.
2. В каком случае применимо распределение Вейбулла?
3. В каком случае применим нормальный закон распределения?
4. В каком случае применимо логарифмическое распределение?
5. Перечислить основные показатели надёжности.
6. Дать определение вероятности безотказной работы.
7. Перечислить показатели безотказности.
8. Перечислить показатели долговечности.
9. Дать определение неремонтируемого изделия. Привести пример.
10. Дать определение ремонтируемого изделия. Привести пример.
11. В каком случае применим закон распределения Пуассона?
12. В каком случае применим экспоненциальный закон распределения?
13. В каком случае применим нормальный закон распределения?
14. Дать определение интенсивности отказов.
15. Дать определение математическому ожиданию.

3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ

3.1. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА

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

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

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

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

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

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

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

Графически функция надёжности представляет собой монотонно убывающую кривую (рис. 5; при $t = 0$ $P(t = 0) = 1$; при $t \rightarrow \infty$ $P(t = \infty) = 0$).

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

$$P(t) = (N - n) / N,$$

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

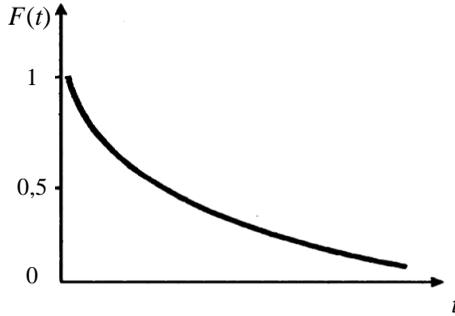


Рис. 5. Кривая функции надёжности

Важнейшим показателем невосстанавливаемого элемента является среднее время безотказной работы (T_0), которое определяют по следующей зависимости:

$$T_0 = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n + (N - n)t}{N}.$$

Следующей характеристикой надёжности невосстанавливаемого элемента является интенсивность отказов, или опасность отказа, которая определяет надёжность элемента в каждый данный момент времени. Интенсивность отказа находят по формуле

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

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

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

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

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

где Δn – число отказов на участке Δt .

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

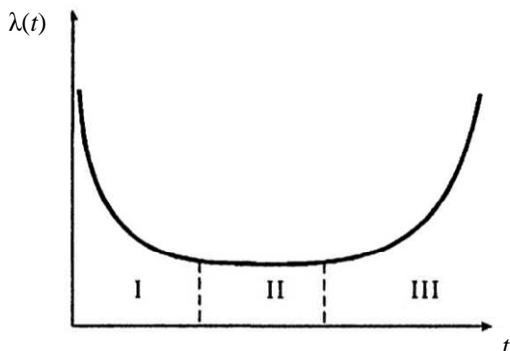


Рис. 6. Кривая интенсивности отказов

Многочисленные опытные данные показывают, что для многих элементов функция $\lambda(t)$ имеет следующий вид (рис. 6).

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

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

Среднее время жизни соответственно равно

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

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

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

3.2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА

Большинство сложных технических систем с длительными сроками службы являются восстанавливаемыми, т.е. возникающие в процессе эксплуатации отказы систем устраняют при ремонте. Технически исправное

состояние изделий в процессе эксплуатации поддерживают проведением профилактических и восстановительных работ.

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

Свойство ремонтпригодности изделий влияет на материальные затраты и длительность простоев в процессе эксплуатации. Ремонтпригодность тесно связана с безотказностью и долговечностью изделий. Так, для изделий с высоким уровнем безотказности, как правило, характерны низкие затраты труда и средств на поддержание их работоспособности.

Показатели безотказности и ремонтпригодности изделий являются составными частями комплексных показателей, таких как коэффициенты готовности K_T и технического использования $K_{Т.И.}$.

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

Средняя наработка на отказ – наработка восстанавливаемого элемента, приходящаяся в среднем на один отказ в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определённой продолжительности эксплуатации:

$$T_0 = 1/m \sum_{i=1}^m t_i,$$

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

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

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

$$T_B = 1/m \sum_{i=1}^m t_{Bi},$$

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

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

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

$$K_r = T_o / (T_o + T_v),$$

где T_o – средняя наработка на отказ; T_v – среднее время восстановления одного отказа.

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

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

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

$$K_{т.и} = t_n / (t_n + t_v + t_p + t_o),$$

где t_n – время работы; t_n – суммарная наработка изделия в рассматриваемый промежуток времени; t_v , t_p и t_o – соответственно суммарное время, затраченное на восстановление, ремонт и техническое обслуживание изделия за тот же период времени, t_n – время работы.

3.3. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ НЕЗАВИСИМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

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

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

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

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

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

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

Для случая экспоненциального распределения среднее время жизни системы равно

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

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

$$T_c = T / m,$$

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

Коэффициент оперативной готовности характеризует надёжность системы, необходимость применения которой возникает в произвольный

момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение системы по назначению не предусматривается), начиная с которого система будет работать безотказно в течение заданного времени t . Значение коэффициента оперативной готовности определяют из выражения

$$K_0 = K_T P(t) = P(t)T_c / (T_c + T_B).$$

3.4. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

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

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

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

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

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

Все показатели надёжности проектируемой системы должны обеспечивать нормальное её функционирование в течение заданного срока эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Дать анализ кривой интенсивности отказов.
2. Дать определение статистической интенсивности отказов.
3. Дать определение среднему времени безотказной работы.
4. Дать определение средней наработке до отказа.
5. Дать понятие среднему времени жизни изделия.
6. Дать определение коэффициента оперативной готовности.
7. Дать определение безотказности.
8. Дать понятие коэффициента технического использования.

4. РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

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

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

Факторы, отрицательно влияющие на надёжность сложных систем, следующие:

- во-первых, это большое число элементов, отказ каждого из которых может привести к отказу всей системы;
- во-вторых, оценить работоспособность сложных систем весьма затруднительно с точки зрения статистических данных, так как они часто являются уникальными или имеются в небольших количествах;
- в-третьих, даже у систем одинакового предназначения каждый экземпляр имеет свои незначительные вариации свойств отдельных элементов, что сказывается на выходных параметрах системы. Чем сложнее система, тем большими индивидуальными особенностями она обладает.

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

- во-первых, сложным системам свойственна самоорганизация, саморегулирование или самоприспособление, когда система способна найти наиболее устойчивое для своего функционирования состояние;
- во-вторых, для сложной системы часто возможно восстановление работоспособности по частям без прекращения её функционирования;
- в-третьих, не все элементы системы одинаково влияют на надёжность сложной системы.

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

При анализе надёжности сложных систем их разбивают на элементы (компоненты) с тем, чтобы вначале рассмотреть параметры и характеристики элементов, а затем оценить работоспособность всей системы. Под элементом можно понимать составную часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами. При исследовании надёжности системы элемент не расчленяется на составные части, и показатели безотказности и долговечности от-

носятся к элементу в целом. При этом возможно восстановление работоспособности элемента независимо от других частей и элементов системы.

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

При анализе надёжности сложной системы все её элементы и компоненты целесообразно разделить на следующие группы:

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

2) элементы, работоспособность которых за рассматриваемый период времени практически не изменяется (станины и корпусные детали, мало нагруженные элементы с большим запасом прочности);

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

4) элементы, отказ которых приводит к отказам системы.

4.2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Структурные схемы надёжности системы с последовательным соединением элементов (рис. 7) – это случай, когда отказ одного элемента вызывает отказ другого элемента, а затем третьего и т.д. Например, большинство приводов машин и механизмы передач подчиняются этому условию. Так, если в приводе машины выйдет из строя любая шестерня, подшипник, муфта, рычаг управления, электродвигатель, насос смазки, то весь привод перестанет функционировать. При этом отдельные элементы в этом приводе не обязательно должны быть соединены последовательно.

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

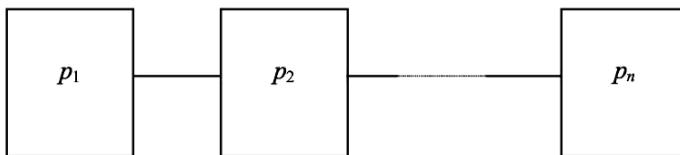


Рис. 7. Структурная схема надёжности системы с последовательным соединением элементов

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

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

Таким образом, надёжность всей системы равна произведению надёжностей подсистем или элементов:

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i) ;$$

$$P = \prod_{i=1}^n p_i ,$$

где P – надёжность.

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

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

4.3. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

В практике проектирования сложных технических систем часто используют схемы с *параллельным соединением элементов* (рис. 8), которые построены таким образом, что отказ системы возможен лишь в случае, когда отказывают все её элементы, т.е. система исправна, если исправен хотя бы один её элемент. Такое соединение часто называют *резервированием*. В большинстве случаев резервирование оправдывает себя, несмотря на увеличение стоимости. Наиболее выгодным является *резервирование отдельных элементов*, которые непосредственно влияют на выполнение основной работы. При конструировании технических систем в зависимо-

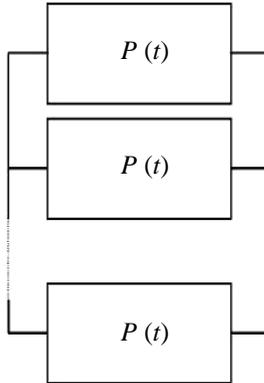


Рис. 8. Структурная схема надёжности системы с параллельным соединением элементов

сти от выполняемой системой задачи применяют горячее или холодное резервирование.

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

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

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

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

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

а вероятность безотказной работы

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

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

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

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

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

4.4. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ С ДРУГИМИ ВИДАМИ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

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

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

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

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

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

Здесь все элементы также имеют одинаковую надёжность.

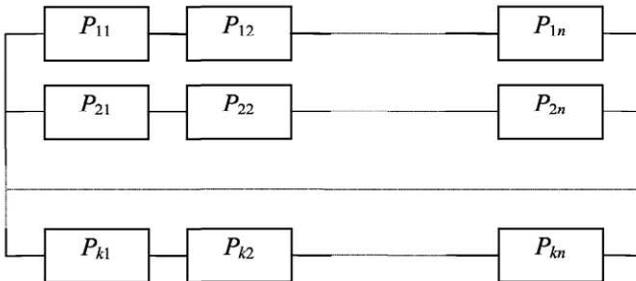


Рис. 9. Структурная схема надёжности с поканальным резервированием

Различают структурные схемы надёжности с поканальным и поэлементным резервированием. Структурная схема надёжности с поканальным резервированием показана на рис. 9.

Формула надёжности выглядит так:

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

При $p_{ij} = p_j$

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

Если $p_{ij} = p$, то

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

В практике проектирования часто используют структурную схему надёжности с поэлементным резервированием (рис. 10).

Надёжность такой системы определяют по формуле

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

При $p_{ij} = p_j$

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

Если $p_{ij} = p$, то

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

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

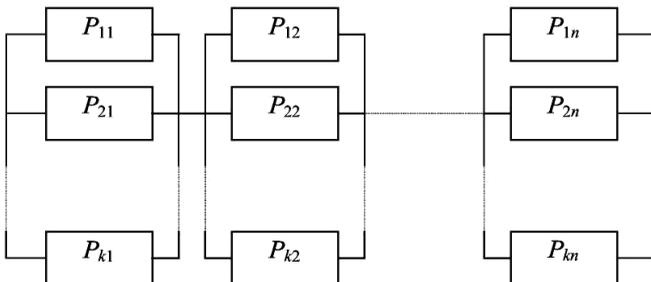


Рис. 10. Структурная схема надёжности с поэлементным резервированием

Контрольные вопросы

1. Дать определение сложной системе.
2. Что такое элемент сложной системы?
3. Перечислить факторы, которые отрицательно влияют на работоспособность сложной системы.
4. Привести методику анализа надёжности сложной системы.
5. Дать понятие резервированию элементов системы.
6. Дать понятие системе с последовательным соединением элементов.
7. Дать понятие системе с параллельным соединением элементов.
8. Дать понятие системы со смешанным соединением элементов.
9. Что такое холодное резервирование?
10. Что такое горячее резервирование?
11. Что такое частично параллельное резервирование системы?
12. Привести пример структурной схемы надёжности с параллельно-последовательным соединением элементов.
13. Привести пример структурной схемы надёжности с поканальным резервированием.
14. Привести пример структурной схемы надёжности с поэлементным резервированием.

5. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Обеспечение безопасности машин и конструкций – составная часть проблемы надёжности. Под безопасностью понимаем надёжность по отношению к жизни и здоровью людей, состоянию окружающей среды.

Вероятностно-статистические методы и теория надёжности начали широко использоваться при расчёте особо ответственных объектов, при анализе крупных аварий.

Основным базовым показателем надёжности и безопасности технических систем может служить вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность проведения производственных процессов без происшествий в течение некоторого времени t , т.е. того, что в заданном интервале времени $t = T$ не возникнет отказа этого объекта.

Значение $P(t)$, как всякой вероятности, может находиться в пределах $0 \leq P(t) \leq 1$. Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $R(t)$ образуют полную группу событий, поэтому

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

Допустимое значение $P(t)$ выбирается в зависимости от степени опасности отказа объекта. Например, для ответственных изделий авиационной техники допустимые значения $P(t) = 0,9999$ и выше, т.е. практически равны единице.

При высоких требованиях к надёжности объекта задаются допустимым значением $P(t) = \gamma\%$ ($\gamma\%$ – вероятность безотказной работы объекта в %) и определяют время работы объекта $t = T\gamma$, соответствующее данной регламентированной вероятности безотказной работы. Значение $T\gamma$ называется гамма-процентным ресурсом и по его значению судят о большей или меньшей безотказности и безопасности объектов.

Пусть $R(t)$ – вероятность возникновения аварийной ситуации на отрезке времени $[0, t]$. Эта вероятность должна удовлетворять условию

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

где R^* – предельно допустимое (нормативное) значение риска возникновения аварийной ситуации.

Используем нормативное значение вероятности безотказной, т.е. безопасной, работы P^* , которая весьма близка к единице (например, $R^* = 1$).

Функция риска на отрезке времени $[0, t]$ дополняет функцию безопасности $P(t)$ до единицы:

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

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

$$r(t) = -P'(t) / P(t) = R'(t) / [1 - R(t)] .$$

Поскольку уровень безопасности должен быть высоким, то можно принять

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

Тогда интенсивность риска аварийной ситуации будет

$$r(t) \approx R'(t) = -P'(t) .$$

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

Средний годовой риск аварии:

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

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

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

Такие показатели риска аварийной ситуации широко используют в гражданской авиации, а в последние годы их начали применять при нормировании безопасности оборудования атомных электростанций.

Для парка одинаковых технических объектов функция безопасности

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

где n – численность парка одинаковых объектов. В этом случае функция риска

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

при условии $nR(t) \ll 1$.

Аналогично для удельного риска:

$$r_n(t) \approx nr(t) \quad \text{и} \quad r_{n\text{cp}} \approx nr_{\text{cp}}(t) .$$

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

В этом случае расчётное условие имеет вид

$$F \leq S / m ,$$

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

5.1. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ «ЧЕЛОВЕК–МАШИНА» (СЧМ)

Надёжность характеризует безошибочность (правильность) решения стоящих перед СЧМ задач. Оценивается вероятностью правильного решения задач, которая, по статистическим данным, определяется соотношением

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

где $m_{\text{от}}$ и N – соответственно число ошибочно решённых и общее число решаемых задач.

Точность работы оператора – степень отклонения некоторого параметра, измеряемого, устанавливаемого или регулируемого оператором, от своего истинного, заданного или номинального значения. Количественно точность работы оператора оценивается величиной погрешности, с которой оператор измеряет, устанавливает или регулирует данный параметр:

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

где $I_{\text{н}}$ – истинное или номинальное значения параметра; $I_{\text{оп}}$ – фактически измеряемое или регулируемое оператором значение этого параметра.

Не всякая погрешность является ошибкой до тех пор, пока величина погрешности не выходит за допустимые пределы.

В работе оператора следует различать случайную и систематическую погрешности. Случайная погрешность оператора оценивается величиной среднеквадратической погрешности, систематическая погрешность – величиной математического ожидания отдельных погрешностей.

Своевременность решения задачи СЧМ оценивается вероятностью того, что стоящая перед СЧМ задача будет решена

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

где $P(T)$ – функция плотности времени решения задачи системой «человек–машина». Эта вероятность по статистическим данным за время, не превышающее допустимое:

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

где $m_{\text{нс}}$ – число несвоевременно решённых СЧМ задач.

В качестве общего показателя надёжности используется вероятность правильного ($P_{\text{пр}}$) и своевременного ($P_{\text{св}}$) решения.

$$P_{\text{СЧМ}} = P_{\text{пр}} P_{\text{СВ}} ;$$

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

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

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

$$K_a = 1 - \frac{H_{\text{оп}}}{H_{\text{СЧМ}}} ,$$

где $H_{\text{оп}}$ – количество информации, перерабатываемой оператором; $H_{\text{СЧМ}}$ – общее количество информации, циркулирующей в системе «человек–машина».

Экономический показатель характеризует полные затраты на систему «человек–машина». В общем случае эти затраты складываются из затрат на создание (изготовление) системы $C_{\text{и}}$, затрат на подготовку операторов $C_{\text{оп}}$ и эксплуатационных расходов C_3 :

$$W_{\text{СЧМ}} = E_{\text{н}} (C_{\text{и}} + C_{\text{оп}}) + C_3 ,$$

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

Эргономические показатели учитывают совокупность специфических свойств СЧМ и представляют иерархическую структуру, включающую в себя ценностную эргономическую характеристику (эргономичность СЧМ), комплексные (управляемость, обслуживаемость, освоимость и обитаемость СЧМ), групповые (социально-психологические, психологические, физиологические, антропометрические, гигиенические) и единичные показатели.

Надёжность оператора – свойство качественно выполнять трудовую деятельность в течение определённого времени при заданных условиях.

Ошибками оператора являются: невыполнение требуемого или выполнение лишнего (несанкционированного) действия, нарушение последовательности выполнения действий, неправильное или несвоевременное выполнение требуемого действия.

В зависимости от последствий ошибки могут быть аварийными и неаварийными.

Надёжность оператора характеризуется показателями безошибочности, готовности, восстанавливаемости и своевременности.

Показателем безошибочности является вероятность безошибочной работы. Для типовых, часто повторяющихся операций в качестве показателя безошибочности может использоваться интенсивность ошибок:

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

где P_j – вероятность безошибочного выполнения операций j -го типа; λ_j – интенсивность ошибок j -го вида; N_j, n_j – общее число выполненных операций j -го вида и допущенное при этом число ошибок; T_j – среднее время выполнения операций j -го вида.

Для участка устойчивой работоспособности оператора можно найти вероятность безошибочного выполнения операций:

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

где k_j – число выполненных операций j -го вида; r – число различных типов операций ($j = 1, 2, \dots, r$).

Коэффициент готовности оператора представляет собой вероятность включения оператора в работу в любой произвольный момент времени:

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

где T_0 – время, в течение которого оператор по тем или иным причинам не находится на рабочем месте; T – общее время работы оператора.

Показатель восстанавливаемости – возможность самоконтроля оператором своих действий и исправления допущенных ошибок, т.е. представляет вероятность исправления оператором допущенной ошибки:

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

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

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

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

где $f(\tau)$ – функция распределения времени решения задачи оператором.

Надёжность деятельности оператора не остаётся величиной постоянной, а меняется с течением времени. Это обусловлено как изменением условий деятельности, так и колебаниями состояния оператора.

Среднее значение вероятности безошибочной работы оператора

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

где P_i – вероятность наступления i -го состояния СЧМ; $P_{\text{оп}/i}$ – условная вероятность безошибочной работы оператора в i -м состоянии; m – число рассматриваемых состояний СЧМ.

Для систем непрерывного типа показателем надёжности является вероятность безотказного, безошибочного и своевременного протекания производственного процесса в течение времени t

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

где $P_{\text{т}}(t)$ – вероятность безотказной работы технических средств; $K_{\text{оп}}$ – коэффициент готовности оператора; $P_{\text{св}}$ – вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий; $P_{\text{исп}}$ – вероятность исправления ошибочных действий.

Для СЧМ дискретного типа:

$$P_{\text{ч.м2}} = K_{\text{т}} P_{\text{т}} P_{\text{оп}} P_{\text{св}} + (1 - P_{\text{т}} K_{\text{т}}) P_{\text{вос}} P_{\text{оп}} P_{\text{св}} + (1 - P_{\text{оп}}) P_{\text{т}} P_{\text{исп}},$$

где $K_{\text{т}}$ – коэффициент готовности техники; $P_{\text{вос}}$ – вероятность восстановления отказавшей техники.

Вероятность $P_{\text{ч.м1}}$ используется в случаях, если:

- 1) технические средства работают исправно;
- 2) произошёл отказ технических средств, но при этом:
 - а) оператор безошибочно и своевременно выполнил требуемые действия по ликвидации аварийной обстановки;
 - б) оператор допустил ошибочные действия, но своевременно их исправил.

Показатель надёжности $P_{\text{ч.м2}}$ используется, если:

- 1) в требуемый момент времени техника находится в исправном состоянии, не отказала в течение времени выполнения задачи, действия оператора были безошибочными и своевременными;
- 2) неготовая или отказавшая техника была своевременно восстановлена, операторы при решении задачи не допускали ошибок;
- 3) при безотказной работе техники оператор допустил ошибку, но своевременно исправил её.

Контрольные вопросы

1. Дать определение системы «человек–машина».
2. Что такое СЧМ дискретного типа?
3. Дать понятие показателю восстанавливаемости.
4. Что такое вероятность выполнения задачи.
5. Охарактеризовать величину – надёжность деятельности оператора.
6. Дать определение показателю надёжности.
7. Указать основной показатель своевременности.

6. ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ И РИСКА

Анализ причин промышленных аварий показывает, что возникновение и развитие крупных аварий, как правило, характеризуется комбинацией случайных локальных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях аварии (отказы оборудования, человеческие ошибки при эксплуатации проектировании, внешние воздействия, разрушение, разгерметизация, выброс, утечка, пролив вещества, испарение, рассеяние веществ, воспламенение, взрыв, интоксикация и т.д.). Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы деревьев отказов и событий.

Модели процессов в человеко-машинных системах должны отражать процесс появления отдельных предпосылок и развития их в причинную цепь происшествия в виде соответствующих диаграмм причинно-следственных связей – диаграмм влияния. Такие диаграммы являются формализованными представлениями моделируемых объектов, процессов, целей, свойств в виде множества графических символов (узлов, вершин) и отношений – предполагаемых или реальных связей между ними. Широкое распространение получили диаграммы в форме *поточковых графов* (графов состояний и переходов), *деревьев событий* (целей, свойств) и *функциональных сетей* различного предназначения и структуры.

В последние десятилетия интенсивно разрабатываются диаграммы влияния из класса семантических или функциональных *сетей*, которые являются графами, но с дополнительной информацией, содержащейся в их узлах и дугах (рёбрах). Достоинства таких сетей: возможность объединения логических и графических способов представления исследуемых процессов, учёт стохастичности информации, выраженной узлами и дугами, доступность для моделирования циклических и многократно наблюдаемых событий, наибольшие (по сравнению с другими типами диаграмм) логические возможности.

Другим (после графов) и наиболее широко используемым типом диаграмм влияния являются «деревья». В безопасности диаграммы данного класса часто называют «деревом происшествий» и «деревом их исходов». Они являются в сущности графами с ветвящейся структурой и с дополнительными (логическими) условиями.

Основные достоинства этих моделей: сравнительная простота построения; дедуктивный характер выявления причинно-следственных связей исследуемых явлений; направленность на их существенные факторы; лёгкость преобразования таких моделей; наглядность реакции изучаемой системы на изменение структуры; декомпозируемость «дерева» и процесса его изучения; возможность качественного анализа исследуемых процессов; лёгкость дальнейшей формализации и алгоритмизации; приспособ-

собленность к обработке на средствах ВТ; доступность для статистического моделирования и количественной оценки изучаемых явлений, процессов и их свойств.

Создание дерева заключается в определении его структуры:

а) элементов – головного события (происшествия) и ему предшествующих предпосылок;

б) связей между ними – логических условий, соблюдение которых необходимо и достаточно для его возникновения.

На практике обычно используют обратную или прямую *последовательность* выявления условий возникновения конкретных происшествий или аварийности и травматизма в целом:

- от головного события *дедуктивно* к отдельным предпосылкам;
- от отдельных предпосылок *индуктивно* к головному событию.

Из анализа структуры диаграммы влияния следует, что основными её компонентами служат *узлы* (вершины) и *связи* (отношения) между ними. В качестве узлов обычно подразумеваются простейшие элементы моделируемых категорий (переменные или константы) – события, состояния, свойства, а в качестве связей – активности, работы, ресурсы и другие взаимодействия. Отношения или связи между переменными или константами в узлах диаграммы графически представляются в виде линий, называемых дугами или рёбрами.

Каждые два соединённых между собой узла образуют ветвь диаграммы. В тех случаях, когда узлы связаны направленными дугами таким образом, что каждый из них является общим ровно для двух ветвей, возникают циклы или петли.

Переменные в узлах характеризуются фреймами данных – множеством выходов (значений, принимаемых переменными, неизменных во времени и между собой не пересекающихся) и условными распределениями вероятностей появления каждого из них.

Идея прогнозирования размеров ущерба от происшествий в человеко-машинных системах основана на использовании деревьев специального типа (деревьев исходов) – вероятностных графов. Их построение позволяет учитывать различные варианты разрушительного воздействия потоков энергии или вредного вещества, высвободившихся в результате происшествия.

С помощью предварительно построенных диаграмм – графов, сетей и деревьев могут быть получены математические модели аварийности и травматизма.

В исследовании безопасности широкое распространение получили диаграммы влияния ветвящейся структуры, называемые «деревом» событий (отказов, происшествий). Деревом событий называют не ориентированный граф, не имеющий циклов, являющийся конечным и связным. В нём каждая пара вершин должна быть связанной (соединённой цепью),

однако все соединения не должны образовывать петель (циклов), т.е. содержать такие маршруты, вершины которых одновременно являются началом одних и концом других цепей.

Структура дерева происшествий обычно включает одно размещаемое сверху нежелательное событие – происшествие (авария, несчастный случай, катастрофа), которое соединяется с набором соответствующих событий – предпосылок (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих определённые их цепи или «ветви». «Листьями» на ветвях дерева происшествий служат предпосылки – инициаторы причинных цепей, рассматриваемые как постулируемые исходные события, дальнейшая детализация которых нецелесообразна. В качестве узлов дерева происшествий могут использоваться как отдельные события или состояния, так и логические условия их объединения (сложения или перемножения).

6.1. ПРОЦЕДУРА АНАЛИЗА «ДЕРЕВА ОТКАЗОВ»

Опасности носят потенциальный, т.е. скрытый характер. Условия реализации потенциальной опасности называются причинами.

Опасность – следствие некоторой причины или группы причин, которая, в свою очередь, является следствием другой причины, т.е. причины и следствия образуют иерархические структуры или системы, так называемые: «дерево событий», «дерево причин», «дерево отказа» или «дерево опасности», «дерево неисправностей».

Процедура построения дерева неисправностей (отказов) включает, как правило, следующие этапы:

1. Определение нежелательного (завершающего) события в рассматриваемой системе.

2. Тщательное изучение возможного поведения и предполагаемого режима использования системы.

3. Определение функциональных свойств событий более высокого уровня для выявления причин тех или иных неисправностей системы и проведение более глубокого анализа поведения системы с целью выявления логической взаимосвязи событий более низкого уровня, способных привести к отказу системы.

4. Построение дерева неисправностей (отказов) для логически связанных событий на входе. Эти события должны определяться в терминах идентифицируемых независимых первичных отказов. Чтобы получить количественные результаты для завершающего нежелательного события дерева, необходимо задать вероятность отказа, коэффициент неготовности, интенсивность отказов, интенсивность восстановлений и другие показатели, характеризующие первичные события, при условии, что события дерева неисправностей не являются избыточными.

Более строгий и систематический анализ предусматривает выполнение таких процедур, как (1) определение границ системы, (2) построение дерева неисправностей, (3) качественная оценка, (4) количественная оценка.

Обычно система изображается в виде блок-схемы, показывающей все функциональные взаимосвязи и элементы. При построении дерева неисправностей исключительно важную роль приобретает правильное задание граничных условий, которые не следует путать с физическими границами системы.

Одним из основных требований, предъявляемых к граничным условиям, является задание завершающего нежелательного события, установление которого требует особой тщательности, поскольку именно для него как для основного отказа системы строится дерево неисправностей. Кроме того, чтобы проводимый анализ был понятен всем заинтересованным лицам, исследователь обязан составить перечень всех допущений, принимаемых при определении системы и построении дерева неисправностей.

Анализ дерева происшествий связан с определением возможности появления или не появления головного события – происшествия конкретного типа. Данные условия устанавливаются путём выделения из всего массива исходных предпосылок двух подмножеств, реализация которых либо приводит, либо не приводит к возникновению головного события. Такие подмножества делятся на *аварийные сочетания* предпосылок, образующие в совокупности с условиями их появления каналы прохождения сигнала до этого события, и *отсечные сочетания*, исключающие условия формирования таких путей к головному событию. Самым удобным способом выявления условий возникновения и предупреждения происшествий является выделение из таких подмножеств так называемых «*минимальных сочетаний событий*», т.е. тех из них, появление которых минимально необходимо и достаточно для достижения желаемого результата.

6.2. ПОСТРОЕНИЕ «ДЕРЕВА ОТКАЗОВ»

Дерево отказов – это топологическая модель надёжности и безопасности, которая отражает логико-вероятностные взаимосвязи между отдельными случайными исходными событиями в виде первичных отказов или результирующих отказов, совокупность которых приводит к главному анализируемому событию. Таким образом, «дерево отказов» – это ориентировочный граф в виде дерева.

Основной целью построения дерева неисправностей является символическое представление существующих в системе условий, способных вызвать её отказ. Кроме того, построенное дерево позволяет показать в явном виде слабые места системы и является наглядным средством представления и обоснования принимаемых решений, а также средством ис-

следования компромиссных соотношений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям.

Выделяют пять типов вершин «дерева отказов» (ДО):

- вершины, отображающие первичные отказы;
- вершины, отображающие результирующие или вторичные отказы;
- вершины, отображающие локальные отказы, которые не влияют на возникновение других отказов;
- вершины, соответствующие операции логического объединения случайных событий (типа «ИЛИ»);
- вершины, соответствующие операции логического произведения случайных событий (типа «И»).

Каждой вершине ДО, отображающей первичный или результирующий отказ, соответствует определенная вероятность возникновения отказа. Одним из основных преимуществ ДО является то, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов систем и событий, которые приводят к постулируемому отказу или аварии. Чтобы определить вероятность отказа, необходимо найти аварийные сочетания, для чего необходимо произвести качественный и количественный анализ «дерева отказов».

Структура «дерева отказа» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в узлах «деревьев» используются знаки «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

Обычно предполагается, что исследователь, прежде чем приступить к построению дерева неисправностей, тщательно изучает систему. Поэтому описание системы должно быть частью документации, составленной в ходе такого изучения.

В зависимости от конкретных целей анализа дерева неисправностей для построения последнего специалисты по надёжности 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 расчётных условиях функционирования системы. Построение дерева неисправностей на основе учёта лишь первичных отказов не представляет большой сложности, так как дерево строится только до той точки, где идентифицируемые первичные отказы элементов вызывают отказ системы. Для иллюстрации этого метода рассмотрим следующий пример.

Метод вторичных отказов. Чтобы анализ охватывал и вторичные отказы, требуется более глубокое исследование системы. При этом анализ выходит за рамки рассмотрения системы на уровне отказов её основных элементов, поскольку вторичные отказы вызываются неблагоприятным воздействием окружающих условий или чрезмерными нагрузками на элементы системы в процессе эксплуатации.

Метод иницированных 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).

6.3. 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 отказов» представлен на рис. 11.

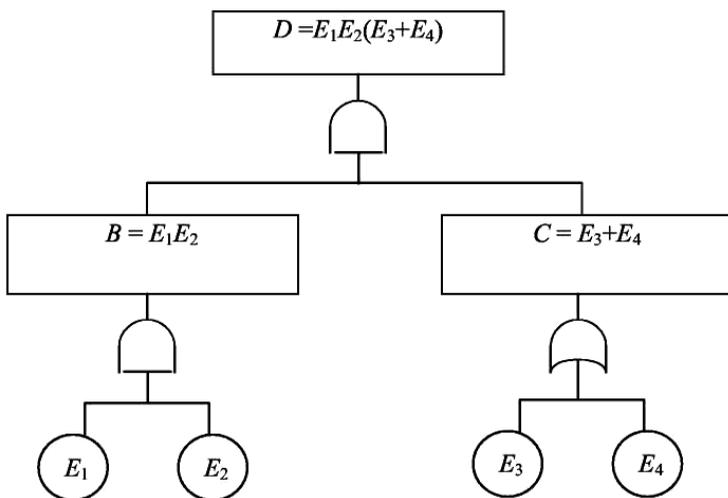


Рис. 11. «Дерево отказов»

Количественная оценка производится на основании информации о таких количественных показателях надёжности для завершающего события, как вероятность отказа, интенсивность отказов или интенсивность восстановлений. Вначале вычисляют показатели надёжности элемента, затем находят критический путь и, наконец, оценивают завершающее событие.

Количественная оценка дерева осуществляется либо методом статического моделирования, либо аналитическим методом.

В первом случае дерево неисправностей моделируется на ЭВМ обычно для нескольких тысяч или даже миллионов циклов функционирования системы. При этом основными этапами моделирования являются:

- задание показателей надёжности для элементарных событий;
- представление всего дерева неисправностей на цифровой ЭВМ;
- составление перечня отказов, приводящих к завершающему событию, и перечня соответствующих минимальных сечений;
- вычисление требуемых конечных результатов.

Во втором случае используют существующие аналитические методы.

6.4. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ВЫВОД ДЛЯ ПРОСТЫХ СХЕМ «ДЕРЕВА ОТКАЗОВ»

Для того чтобы дерево неисправностей отвечало своему назначению, в нём используются схемы, показывающие логические связи между отказами основных элементов системы и завершающим событием. Для представления этих логических схем в математической форме применяются основные законы булевой алгебры.

Схема «ИЛИ» изображается символом \cup или $+$. Любой из этих символов показывает объединение событий, связанных со схемой «ИЛИ». Математическое описание схем «ИЛИ» с двумя событиями на входе дано на рис. 12.

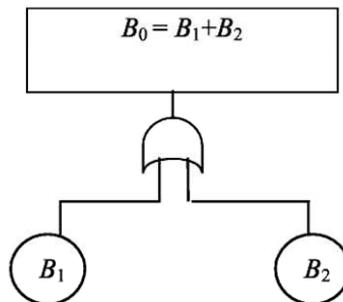


Рис. 12. Схема «ИЛИ» с двумя выходами

Событие B_0 на выходе схемы «ИЛИ» записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 + B_2,$$

где B_1 и B_2 – события на входе.

Схема «И» изображается символом * или \cap . Этот символ обозначает пересечение событий. Схема «И» с двумя входами показана на рис. 13. Событие B_0 на выходе схемы «И» записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 B_2.$$

Схема «И» с приоритетом логически эквивалентна схеме «И», но отличается от неё тем, что события на её входе должны происходить в определённом порядке. Схема «И» с приоритетом, имеющая два входа, показана на рис. 14. В данном случае предполагается, что событие A_1 должно наступить раньше события A_2 .

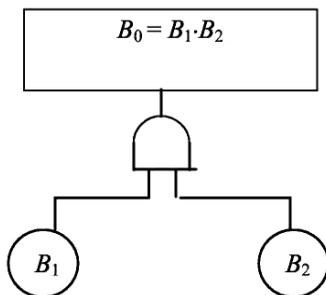


Рис. 13. Схема «И» с двумя входами

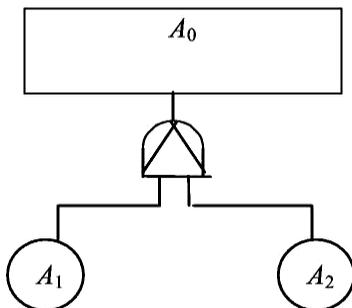


Рис. 14. Приоритетная схема «И» с двумя входами

6.5. «ДЕРЕВО ОТКАЗОВ» С ПОВТОРЯЮЩИМИСЯ СОБЫТИЯМИ

Характерная конфигурация такого дерева неисправностей показана на рис. 15.

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

$$T = CB_0, \quad B_1 = A_1 + A_2;$$

$$B_0 = B_1B_2, \quad B_2 = A_1 + A_3,$$

где A_1, A_2, A_3 и C – элементарные события; B_1, B_2, B_0 – промежуточные события; T – завершающее событие.

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

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

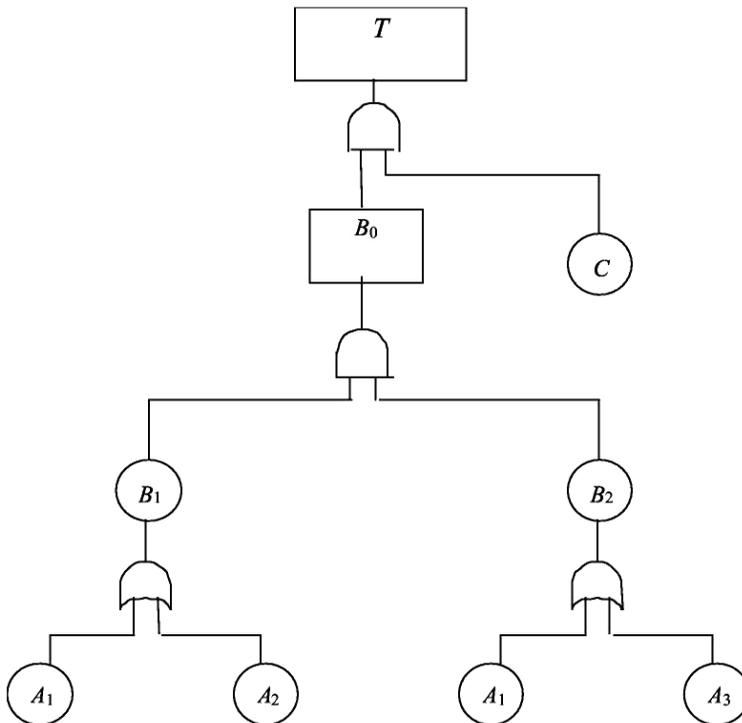


Рис. 15. «Дерево отказов» в случае повторяющихся событий

Согласно рис. 15, отказ A_1 является повторяющимся элементарным событием, поэтому полученное выражение необходимо упростить, используя распределительный закон булевой алгебры.

В результате получаем

$$T = C[A_1 + A_2A_3],$$

и первоначальное «дерево неисправностей» (рис. 15) принимает вид, показанный на рис. 16.

Таким образом, прежде чем находить количественные показатели надёжности и риска, следует упростить выражения с повторяющимися событиями, используя свойства булевой алгебры, в противном случае будут получены ошибочные количественные оценки.

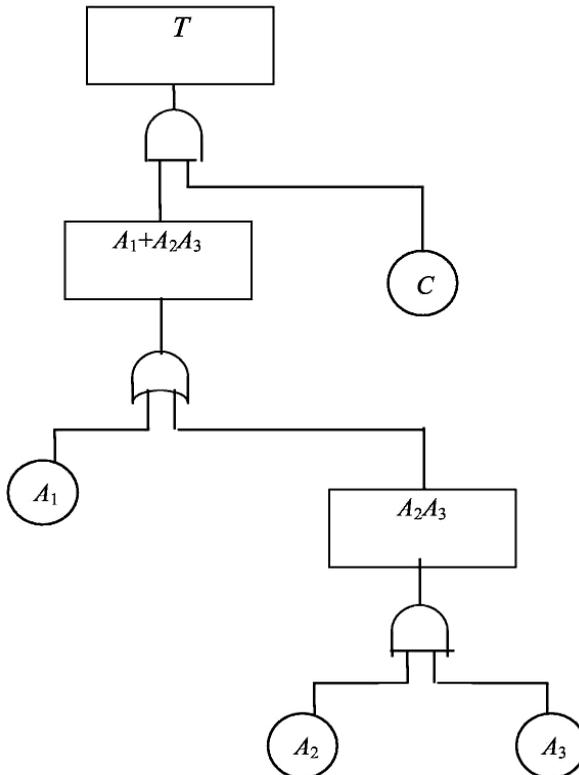


Рис. 16. Упрощённое «дерево неисправностей»

6.6. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ МЕТОДА «ДЕРЕВА ОТКАЗОВ»

Данный метод, как и любой другой, обладает определёнными достоинствами и недостатками. Так, например, метод даёт представление о поведении системы, но требует от специалистов по надёжности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определённого отказа; помогает дедуктивно выявлять отказы; даёт конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений и анализа компромиссных решений; позволяет выполнять количественный и качественный анализ надёжности; облегчает анализ надёжности сложных систем. Вместе с тем реализация метода требует значительных затрат средств и времени. Кроме того, полученные результаты трудно проверить и трудно учесть состояния частичного отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа. Существенные трудности возникают и при получении в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащих резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов.

Контрольные вопросы

1. Дать определение аварии.
2. Что такое потоковые графы?
3. Дать понятие дедуктивного анализа «дерева отказов».
4. Дать понятие индуктивного анализа «дерева отказов».
5. Дать определение «дереву отказов».
6. Перечислить типы вершин «дерева отказов».
7. Дать определение методу первичных отказов.
8. Дать определение методу вторичных отказов.
9. Дать понятие «дереву отказов» в случае повторяющихся событий.
10. Дать понятие упрощённому «дереву неисправностей».
11. Причислить достоинства и недостатки метода «дерева отказов».

7. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

7.1. КОНСТРУКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ

Одной из важнейших характеристик сложных технических систем является их надёжность. Требования к количественным показателям надёжности возрастают тогда, когда отказы технической системы приводят к большим затратам материальных средств, либо угрожают безопасности (например, при создании атомных лодок, самолётов или изделий военной техники). Один из разделов технического задания на разработку системы – раздел, определяющий требования к надёжности. В этом разделе указывают количественные показатели надёжности, которые необходимо подтверждать на каждом этапе создания системы.

На этапе разработки технической документации, являющейся комплектом чертежей, технических условий, методик и программ испытаний, выполнение научно-исследовательских расчётов, подготовки эксплуатационной документации и обеспечение надёжности осуществляют способами рационального проектирования и расчётно-экспериментальными методами оценки надёжности.

Важное место в обеспечении надёжности системы занимает подбор металла, из которого конструируют силовые узлы металлоконструкций, так как от несущих конструкций зависит надёжность и долговечность изделия. Для изделий, работающих в стационарных условиях, чаще всего используют обычные углеродистые стали, а для изделий, работающих в условиях переменных нагрузок с высокой интенсивностью, – высоколегированные. В зависимости от внешних воздействующих факторов и условий нагружения подбирают соответствующие материалы с определёнными характеристиками.

Существуют несколько методов, с помощью которых можно повысить конструктивную надёжность сложной технической системы. Конструктивные методы повышения надёжности предусматривают создание запасов прочности металлоконструкций, облегчение режимов работы электроавтоматики, упрощение конструкции, использование стандартных деталей и узлов, обеспечение ремонтпригодности, обоснованное использование методов резервирования.

Наряду с конструктивными методами, обеспечивающими работоспособность системы, широко применяют *вероятностные методы оценки её надёжности* на этапах эскизного и рабочего проектирования. С целью определения количественных показателей надёжности составляют функциональную схему и циклограмму работы системы во времени при её эксплуатации. Более полному пониманию работы системы способствует принципиальная схема, в которой подробно описывают соединение узлов

и элементов, а также их назначение. На основании функциональной и принципиальной схем работы системы составляют структурную схему надёжности с указанием резервирования отдельных элементов, узлов и каналов. На основании структурной схемы надёжности составляют перечень элементов и узлов с указанием интенсивностей отказов, взятых из справочной литературы или полученных по результатам испытаний или эксплуатации. Далее на основании исходных данных выполняют расчёт проектной надёжности системы.

Анализ и прогнозирование надёжности на стадии проектирования дают необходимые данные для оценки конструкции. Такой анализ проводят для каждого варианта конструкции, а также после внесения конструктивных изменений. При обнаружении конструктивных недостатков, снижающих уровень надёжности системы, проводят конструктивные изменения и корректируют техническую документацию.

7.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Одним из основных мероприятий на стадии серийного производства, направленных на обеспечение надёжности технических систем, является *стабильность технологических процессов*. Научно обоснованные методы управления качеством продукции позволяют своевременно давать заключение о качестве выпускаемых изделий. На предприятиях промышленности применяют два метода *статистического контроля качества*: текущий контроль технологического процесса и выборочный метод контроля.

Метод статистического контроля (регулирования) качества позволяет своевременно предупреждать брак в производстве и, таким образом, непосредственно вмешиваться в технологический процесс.

Выборочный метод контроля не оказывает непосредственного влияния на производство, так как он служит для контроля готовой продукции, позволяет выявить объём брака, причины его возникновения в технологическом процессе или же качественные недостатки материала.

Анализ точности и стабильности технологических процессов позволяет выявить и исключить факторы, отрицательно влияющие на качество изделия. В общем случае контроль стабильности технологических процессов можно проводить следующими методами: графоаналитическим с нанесением на диаграмму значений измеряемых параметров; расчётно-статистическим для количественной характеристики точности и стабильности технологических процессов; а также прогнозированием надёжности технологических процессов на основе количественных характеристик приведённых отклонений.

Расчётно-статистическим методом определяют коэффициент точности (K_T) и коэффициент смещения (K_C).

Коэффициент точности характеризует соотношение полей допуска исследуемого параметра (размера). Его значение определяют по формуле

$$K_T = T / \omega,$$

где T – допуск; ω – поле рассеяния контролируемого параметра в соответствующей выборке.

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

$$K_c = (x - \Delta_0) / 2,$$

где x – среднее арифметическое значение центра рассеяния; Δ_0 – координата середины поля допуска

$$\Delta_0 = (T_n + T_v) / 2,$$

где T_n и T_v – нижнее и верхнее предельные отклонения параметра.

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

7.3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Надёжность технических систем в условиях эксплуатации определяется рядом эксплуатационных факторов, таких как квалификация обслуживающего персонала, качество и количество проводимых работ по техническому обслуживанию, наличие запасных частей, использование измерительной и проверочной аппаратуры, а также наличие технических описаний и инструкций по эксплуатации.

В процессе эксплуатации отказы системы принято подразделять на две основные категории – внезапные отказы и постепенные.

Внезапные отказы связаны с наличием в изделии скрытых производственных дефектов, причинами конструктивного характера, ошибками обслуживающего персонала.

Постепенные отказы системы обусловлены постепенными изменениями параметров. Такое изменение параметров в основном вызвано старением элементной базы системы.

В первом приближении можно принять, что все отказы, возникающие в процессе эксплуатации, являются *независимыми*. Поэтому надёжность всей системы при предположении независимости отказов равна

$$P = P_1 P_2 P_3,$$

где P_1, P_2, P_3 – вероятности безотказной работы системы соответственно по непрогнозируемым внезапным отказам, внезапным отказам, которые могут быть предотвращены при своевременном техническом обслуживании, и постепенным отказам.

Одной из причин отсутствия отказов элементов системы является качественное техническое обслуживание, которое направлено на предотвращение прогнозируемых внезапных отказов. Вероятность безотказной работы системы, обусловленная качеством обслуживания, равна

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

где P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента, связанная с техническим обслуживанием.

По мере совершенствования обслуживания значение вероятности безотказной работы P_2 приближается к единице.

Замена элементов с возрастающей во времени интенсивностью отказов возможна во всех сложных технических системах. С целью уменьшения во времени интенсивности отказов вводят техническое обслуживание системы, которое направлено на снижение внезапных отказов.

7.4. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для повышения надёжности сложных технических систем в условиях эксплуатации проводят ряд мероприятий, которые можно подразделить на следующие четыре группы:

- 1) разработку научных методов эксплуатации;
- 2) сбор, анализ и обобщение опыта эксплуатации;
- 3) связь проектирования с производством изделий машиностроения;
- 4) повышение квалификации обслуживающего персонала.

Научные методы эксплуатации включают в себя научно обоснованные методы подготовки изделия к работе, проведения технического обслуживания, ремонта и других мероприятий по повышению надёжности сложных технических систем в процессе их эксплуатации. Порядок и технологию проведения этих мероприятий описывают в соответствующих руководствах и инструкциях по эксплуатации конкретных изделий. Более качественное выполнение эксплуатационных мероприятий по обеспечению надёжности изделий машиностроения обеспечивается результатами статистического исследования надёжности этих изделий. При эксплуатации изделий большую роль играет накопленный опыт. Значительную часть опыта эксплуатации используют для решения частных организационно-технических мероприятий. Однако накопленные данные необходимо

использовать не только для решения задач сегодняшнего дня, но и для создания будущих изделий с высокой надёжностью.

Большое значение имеет правильная организация сбора сведений об отказах. Содержание мероприятий по сбору таких сведений определяется типом изделий и особенностями эксплуатации этих изделий. Возможными источниками статистической информации могут быть сведения, полученные по результатам различных видов испытаний и эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы для повышения надёжности?
2. Дать понятие научным методам эксплуатации.
3. Дать понятие расчётно-статистическому методу.
4. Что такое коэффициент точности?
5. Что такое коэффициент смещения?
6. Дать определение методу статистического контроля (регулирования) качества.
7. Дать понятие вероятностным методам оценки надёжности.

8. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА

8.1. ПОНЯТИЕ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА

При решении комплексных вопросов безопасности в развитых странах широко применяется методология риска, основу которой составляет определение последствий и вероятности нежелательных событий. Используя количественные показатели риска, в принципе можно «измерять» потенциальную опасность и даже сравнивать опасности различной природы. При этом в качестве показателей опасности обычно понимают индивидуальный или социальный риск гибели людей (или в общем случае причинения определённого ущерба).

В широком смысле слова риск выражает возможную опасность, вероятность нежелательного события. Применительно к проблеме безопасности жизнедеятельности таким событием может быть ухудшение здоровья или смерть человека, авария или катастрофа технической системы или устройства, загрязнение или разрушение экологической системы, гибель группы людей или возрастание смертности населения, материальных ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличения затрат на безопасность.

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

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

где R – риск; N – количественный показатель частоты нежелательных событий в единицу времени t ; Q – число объектов риска, подверженных определённому фактору риска f .

Вероятность возникновения опасности – величина, существенно меньшая единицы.

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

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

где f – число несчастных случаев (смертельных исходов) от данной опасности чел⁻¹·год⁻¹, (для отечественной практики $f = K_4 = 10^{-3}$, т.е. соответствует значению коэффициента частоты несчастного случая K_4 , делённого на 1000); $\prod p_i$ – произведение вероятностей нахождения работника в «зоне риска».

Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций – результат определённой совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками.

Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать индивидуальный, техногенный, экологический, социальный и экономический риск. Каждый вид его обуславливают характерные источники и факторы риска.

Техногенный риск – комплексный показатель надёжности элементов техносферы. Он выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений:

$$R_t = \frac{\Delta T(f)}{T(f)},$$

где R_t – 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 .

Источники технического риска: низкий уровень научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; опытное производство новой техники; серийный выпуск небезопасной техники; нарушение правил безопасной эксплуатации технических систем.

Наиболее распространённые 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.

8.2. МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ РИСКА

Методологическое обеспечение анализа риска – это совокупность методов, методик и программных средств, позволяющих всесторонне выявить опасности и оценить риск чрезвычайной ситуации, источником которой может являться промышленный объект. Выполнение требований

к методологическому обеспечению анализа опасностей и риска необходимо для повышения точности и объективности результатов исследования опасностей промышленного объекта, а также для повышения эффективности выработки мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций.

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

Вкладом в реализацию Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и определённым шагом на пути решения проблемы оценки риска следует считать разработку Госгортехнадзором России «Методических указаний по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД 03-418-01)». Впервые в отечественную нормативную систему введён документ, содержащий терминологию и методологию анализа риска. Риск или степень риска предлагается рассматривать как сочетание частоты (вероятности) и последствий конкретного опасного события. Математическое выражение риска P – это соотношение числа неблагоприятных проявлений опасности n к их возможному числу N за определённый период времени, т.е. $P = n / N$. Помимо этого используется понятие «степень риска» R , т.е. вероятность наступления нежелательного события с учётом размера возможного ущерба от события. Степень риска можно представить как математическое ожидание величины ущерба от нежелательного события:

$$R(m) = \sum_{i=1}^n p_i m_i ,$$

где p_i – вероятность наступления события, связанного с ущербом; m_i – случайная величина ущерба, причинённого экономике, здоровью и т.п.

Принято различать:

– индивидуальный риск – вероятность гибели человека при данном виде деятельности;

– социальный риск – зависимость числа погибших людей от частоты возникновения события, вызывающего поражение этих людей.

Значение индивидуального риска используется для количественной оценки потенциальной опасности конкретного рабочего места, вида деятельности, рабочей зоны и т.п., социального – для интегральной количественной оценки опасных производственных объектов, характеристики масштаба воздействия аварии.

Несмотря на различие в подходах к последовательности этапов процесса управления риском, можно выделить три общие для всех документов составляющие этого процесса: информацию о производственной безопасности, анализ риска и контроль производственной безопасности. Анализ риска базируется на собранной информации и определяет меры по

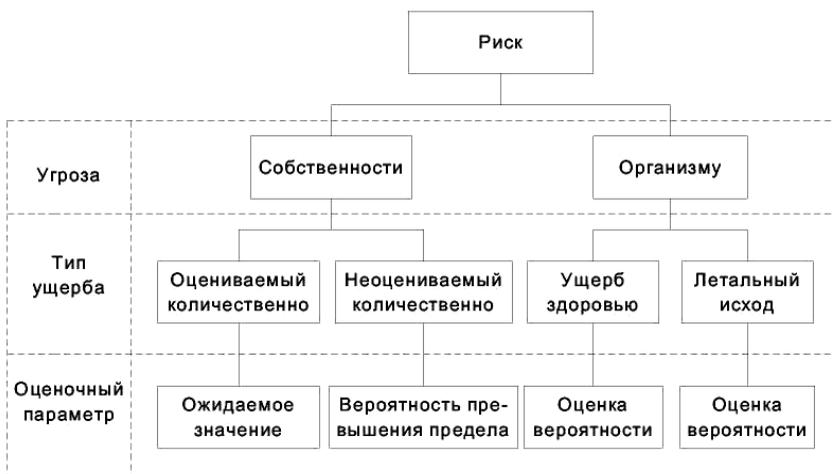


Рис. 17. Схема оценки риска [16]

контролю безопасности технологической системы, поэтому основная задача анализа риска заключается в том, чтобы обеспечить рациональное основание для принятия решений в отношении риска (рис. 17).

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.

Анализ риска заключается в выявлении (идентификации) опасностей и оценке риска, когда под опасностью понимается источник потенциального ущерба или вреда или ситуация с возможностью нанесения ущерба, а под идентификацией опасности – процесс выявления и признания, что опасность существует, и определение её характеристик. Применение понятия риск, таким образом, позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Риск фактически есть мера опасности.

Оценка риска включает в себя анализ частоты, анализ последствий и их сочетание. Анализ риска проводится по следующей общей схеме:

1. Планирование и организация.
2. Идентификация опасностей.
 - 2.1. Выявление опасностей.
 - 2.2. Предварительная оценка характеристик опасностей.
3. Оценка риска.
 - 3.1. Анализ частоты.
 - 3.2. Анализ последствий.
 - 3.3. Анализ неопределённостей.
4. Разработка рекомендаций по управлению риском.

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

- указать причины и проблемы, вызывавшие необходимость проведения риск-анализа;
- определить анализируемую систему и дать её описание;
- подобрать соответствующую команду для проведения анализа;
- установить источники информации о безопасности системы;
- указать исходные данные и ограничения, обуславливающие пределы риск-анализа;
- чётко определить цели риск-анализа и критерий приемлемого риска.

Следующий этап анализа риска – идентификация опасностей. Основная задача – выявление (на основе информации о данном объекте, результатов экспертизы и опыта работы подобных систем) и чёткое описание всех присущих системе опасностей. Здесь же проводится предварительная оценка опасностей с целью выбора дальнейшего направления деятельности:

- прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей;
- провести более детальный анализ риска;
- выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

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

После идентификации опасностей переходят к этапу оценки риска, на котором идентифицированные опасности должны быть оценены на основе критериев приемлемого риска, чтобы идентифицировать опасности с неприемлемым уровнем риска, что является основой для разработки рекомендации и мер по уменьшению опасностей. При этом критерий приемлемого риска и результаты оценки риска могут быть выражены как качественно (в виде текстового описания), так и количественно (например, в виде числа несчастных случаев или аварий в год).

Согласно определению оценка риска включает в себя анализ частоты и анализ последствий. Однако, когда последствия незначительны или частота крайне мала, достаточно оценить один параметр. Для анализа частоты обычно используются:

- исторические данные, соответствующие по типу системы, объекта или вида деятельности;
- статистические данные по аварийности и надёжности оборудования;
- логические методы анализа «деревьев событий» или «деревьев отказов» (при ортодоксальном подходе к предмету эти методы обычно рассматриваются как единственно приемлемые для оценки риска);
- экспертная оценка с учётом мнения специалистов в данной области.

Анализ последствий включает оценку воздействий на людей, имущество или окружающую среду. Для прогнозирования последствий необходимы модели аварийных процессов, понимание их сущности и сущности используемых поражающих факторов, так как нужно оценить физические эффекты нежелательных событий (пожаров, взрывов, выбросов токсичных веществ) и использовать критерии поражения изучаемых объектов воздействия.

На этапе оценки риска следует проанализировать возможную неопределённость результатов, обусловленную неточностью информации по надёжности оборудования и ошибкам персонала, а также принятых допущений, применяемых при расчёте моделей аварийного процесса. Анализ неопределённости – это перевод неопределённости исходных параметров и предложений, использованных при оценке риска, в неопределённость результатов.

Наибольший объём рекомендаций по обеспечению безопасности выработывается с применением качественных (инженерных) методов анализа риска, позволяющих достигать основных целей риск-анализа при использовании меньшего объёма информации и затрат труда. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях – и единственно допустимы, в частности, для сравнения опасностей различной природы или при экспертизе особо опасных сложных технических систем.

Разработка рекомендаций по уменьшению риска (управлению риском) является заключительным этапом анализа риска. Рекомендации могут признать существующий риск приемлемым или указывать меры по уменьшению риска, т.е. меры по его управлению. Меры по управлению риском могут иметь технический, эксплуатационный или организационный характер.

Контрольные вопросы

1. Дать определение риска.
2. Дать определение коллективному риску.
3. Дать определение территориальному риску.
4. Дать определение индивидуальному риску.
5. Какие данные могут быть использованы для анализа риска?
6. Что такое идентификация опасностей?
7. Что включает в себя оценка риска?
8. Что такое анализ риска?

9. КАЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКА

Объектом анализа опасностей как источника техногенного риска является система «человек–машина–окружающая среда (ЧМС)», в которой в единый комплекс объединены технические объекты, люди и окружающая среда, взаимодействующие друг с другом.

Анализ опасностей и риска позволяет определить источники опасностей, потенциальные аварии и катастрофы, последовательности развития событий, вероятности аварий, величину риска, величину последствий, пути предотвращения аварий и смягчения последствий.

Методы определения потенциального риска можно разделить на:

- инженерные методы с использованием статистики, когда производится расчёт частот, проводится вероятностный анализ безопасности и построение «деревьев опасности»;
- модельные методы основаны на построении моделей воздействия опасных и вредных факторов на отдельного человека, на профессиональные и социальные группы населения;
- экспертные методы включают определение вероятностей различных событий на основе опроса опытных специалистов-экспертов;
- социологические методы, которые основаны на опросе населения.

Для отражения различных аспектов опасности эти методы применяются в комплексе.

Анализ риска описывает опасности качественно и количественно и заканчивается планированием предупредительных мероприятий. Он базируется на знании алгебры логики и событий, теории вероятностей, статистическом анализе, требует инженерных знаний и системного подхода.

Качественные методы анализа риска позволяют определить источники опасностей, потенциальные аварии и несчастные случаи, последовательности развития событий, пути предотвращения аварий (несчастных случаев) и смягчения последствий.

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

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

- предварительный анализ опасностей;
- анализ последствий отказов;
- анализ опасностей методом потенциальных отклонений;
- анализ ошибок персонала;
- причинно-следственный анализ;
- анализ опасностей с помощью «дерева причин»;
- анализ опасностей с помощью «дерева последствий».

Предварительный анализ опасностей (ПАО), заключается в выявлении источника опасностей, определении системы или событий, которые могут вызывать опасные состояния, характеристике опасностей в соответствии с вызываемыми ими последствиями.

Предварительный анализ опасностей осуществляют в следующем порядке:

- изучают технические характеристики объекта, системы, процесса, используемые энергетические источники, рабочие среды, материалы и устанавливают их повреждающие свойства;
- устанавливают нормативно-техническую документацию, действие которой распространяется на данный технический объект, систему, процесс;
- проверяют существующую техническую документацию на её соответствие нормам и правилам безопасности;
- составляют перечень опасностей, в котором указывают идентифицированные источники опасностей, повреждающие факторы, потенциальные аварии, выявленные недостатки.

В целом ПАО представляет собой первую попытку выявить оборудование технической системы (в её начальном варианте) и отдельные события, которые могут привести к возникновению опасностей. Этот анализ выполняется на начальном этапе разработки системы. Детальный анализ возможных событий обычно проводится с помощью «дерева отказов», после того как система полностью определена.

Анализ последствий отказов (АПО) – качественный метод идентификации опасностей, основанный на системном подходе и имеющий характер прогноза. АПО является анализом индуктивного типа, с помощью которого систематически, на основе последовательного рассмотрения одного элемента за другим, анализируются все возможные виды отказов или аварийные ситуации и выявляются их результирующие воздействия на систему.

Отдельные аварийные ситуации и виды отказов элементов позволяют определить их воздействие на другие близлежащие элементы и систему в целом. АПО осуществляют в следующем порядке:

- техническую систему (объект) подразделяют на компоненты;
- для каждого компонента выявляют возможные отказы;
- изучают потенциальные аварии, которые могут вызвать отказы на исследуемом объекте;
- отказы ранжируют по опасностям и разрабатывают предупредительные меры.

Результаты анализа последствий отказа представляются в виде таблиц с перечнем оборудования, видов и причин возможных отказов, с частотой, последствиями, критичностью, средствами обнаружения неисправ-

ности (сигнализаторы, приборы контроля и т.п.) и рекомендациями по уменьшению опасности.

В качестве примера в табл. 1 приведены показатели (индексы) уровня и критерии критичности по вероятности и тяжести последствий отказа. Для анализа выделены четыре группы, которым может быть нанесён ущерб от отказа: персонал, население, имущество (оборудование, сооружения, здания, продукция и т.п.), окружающая среда.

Критерии отказов по тяжести последствий:

– *катастрофический отказ* – приводит к смерти людей, существенному ущербу имуществу, наносит невосполнимый ущерб окружающей среде;

– *критический (некритический) отказ* – угрожает (не угрожает) жизни людей, приводит (не приводит) к существенному ущербу имуществу, окружающей среде;

– *отказ с пренебрежимо малыми последствиями* – отказ, не относящийся по своим последствиям ни к одной из первых трёх категорий.

Категории (критичность) отказов:

A – обязателен количественный анализ риска или требуются особые меры обеспечения безопасности;

B – желателен количественный анализ риска или требуется принятие определённых мер безопасности;

1. Матрица «Вероятность – тяжесть последствий»

Отказ	Частота возникновения отказа в год	Тяжесть последствий отказа			
		катастрофического	критического	некритического	с пренебрежимо малыми последствиями
Частный	> 1	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>C</i>
Вероятный	10^{-2}	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Возможный	$10^{-2} \dots 10^{-4}$	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Редкий	$10^{-4} \dots 10^{-6}$	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Практически невероятный	$< 10^{-6}$	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>D</i>

C – рекомендуется проведение качественного анализа опасностей или принятие некоторых мер безопасности;

D – анализ и принятие специальных (дополнительных) мер безопасности не требуется.

Этим методом можно оценить опасный потенциал любого технического объекта. По результатам анализов отказов могут быть собраны данные о частоте отказов, необходимые для количественной оценки уровня опасности рассматриваемого объекта.

Анализ опасностей методом потенциальных отклонений (АОМПО) включает процедуру искусственного создания отклонений с помощью ключевых слов. Для этого разбивают технологический процесс или техническую систему на составные части и, создавая с помощью ключевых слов отклонения, систематично изучают их потенциальные причины и те последствия, к которым они могут привести на практике.

В процессе анализа для каждой составляющей опасного производственного объекта или технологического блока определяются возможные отклонения, причины и указания по их недопущению. При характеристике отклонения используются ключевые слова *«нет»*, *«больше»*, *«меньше»*, *«так же, как»*, *«другой»*, *«иначе, чем»*, *«обратный»* и т.п. Применение ключевых слов помогает исполнителям выявить все возможные отклонения. Конкретное сочетание этих слов с технологическими параметрами определяется спецификой производства.

Примерное содержание ключевых слов следующее:

«нет» – отсутствие прямой подачи вещества, когда она должна быть;

«больше (меньше)» – увеличение (уменьшение) значений режимных переменных по сравнению с заданными параметрами (температуры, давления, расхода);

«так же, как» – появление дополнительных компонентов (воздух, вода, примеси);

«другой» – состояние, отличающееся от обычной работы (пуск, остановка, повышение производительности и т.д.);

«иначе, чем» – полное изменение процесса, непредвиденное событие, разрушение, разгерметизация оборудования;

«обратный» – логическая противоположность замыслу, появление обратного потока вещества.

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

Степень опасности отклонений может быть определена количественно путём оценки вероятности и тяжести последствий рассматриваемой ситуации по критериям критичности аналогично методу АПО (см. табл. 1).

Контрольные вопросы

1. В чём заключается предварительный анализ опасностей?
2. Дать определение катастрофическому отказу.
3. Дать определение критическому (некритическому) отказу.
4. Что такое анализ последствий отказов (АПО)?
5. Перечислите критерии отказов по тяжести последствий.
6. В чём заключается предварительный анализ опасностей (ПАО)?
7. Что включает в себя анализ опасностей методом потенциальных отклонений (АОМПО)?
8. Дать определение отказу с пренебрежимо малыми последствиями.

10. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКА

Количественный анализ опасностей даёт возможность определить вероятности аварий и несчастных случаев, величину риска, величину последствий. Методы расчёта вероятностей и статистический анализ являются составными частями количественного анализа опасностей. Установление логических связей между событиями необходимо для расчёта вероятностей аварии или несчастного случая.

Методы количественного анализа риска, как правило, характеризуются расчётом нескольких показателей риска и могут включать один или несколько вышеупомянутых методов (или использовать их результаты). Проведение количественного анализа требует высокой квалификации исполнителей, большого объёма информации по аварийности, надёжности оборудования, выполнения экспертных работ, учёта особенностей окружающей местности, метеоусловий, времени пребывания людей в опасных зонах и других факторов.

Количественный анализ риска позволяет оценивать и сравнивать различные опасности по единым показателям, он наиболее эффективен:

- на стадии проектирования и размещения опасного производственного объекта;
- при обосновании и оптимизации мер безопасности;
- при оценке опасности крупных аварий на опасных производственных объектах, имеющих однотипные технические устройства (например, магистральные трубопроводы);
- при комплексной оценке опасностей аварий для людей, имущества и окружающей природной среды.

При анализе опасностей сложные системы разбивают на подсистемы. Подсистемой называют часть системы, которую выделяют по определённому признаку, отвечающему конкретным целям и задачам функционирования системы. Подсистема может рассматриваться как самостоятельная система, состоящая из других подсистем, т.е. иерархическая структура сложной системы может состоять из подсистем различных уровней, где подсистемы низших уровней входят составными частями в подсистемы высших уровней. В свою очередь, подсистемы состоят из компонентов – частей системы, которые рассматриваются без дальнейшего деления как единое целое.

Логический анализ внутренней структуры системы и определение вероятности нежелательных событий E как функции отдельных событий E_i являются одной из задач анализа опасностей.

Итак, количественная оценка риска представляет собой процесс оценки численных значений вероятности и последствий нежелательных процессов, явлений, событий, а, стало быть, к достоверности получаемых оценок надо подходить осторожно.

Для численной оценки риска используют различные математические формулировки.

Обычно при оценке риска его характеризуют двумя величинами – вероятностью события P и последствиями X , которые в выражении математического ожидания выступают как сомножители:

$$R = PX.$$

По отношению к источникам опасностей оценка риска предусматривает разграничение нормального режима работы R_n и аварийных ситуаций $R_{ав}$:

$$R = R_n + R_{ав} = P_n X_n + P_{ав} X_{ав}.$$

В случае когда последствия неизвестны, то под риском понимают вероятность наступления определённого сочетания нежелательных событий

$$R = \sum_{i=1}^n P_i.$$

При необходимости можно использовать определение риска как вероятности превышения предела x :

$$R = P\{\xi > x\},$$

где ξ – случайная величина.

Техногенный риск оценивают по формуле, включающей как вероятность нежелательного события, так и величину последствий в виде ущерба U :

$$R = PU.$$

Если каждому нежелательному событию, происходящему с вероятностью P_i , соответствует ущерб U_i , то величина риска будет представлять собой ожидаемую величину ущерба

$$R = U_* = \sum_{i=1}^n P_i U_i.$$

Если все вероятности наступления нежелательного события одинаковы ($P_i = P, i = 1, n$), то следует

$$R = P \sum_{i=1}^n U_i.$$

Когда существует опасность здоровью и материальным ценностям, риск целесообразно представлять в векторном виде с различными единицами измерения по координатным осям:

$$\vec{R} = \vec{U} \vec{P}.$$

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

$$R = U^* / (MT).$$

Общий риск для группы людей (коллективный риск)

$$R = U^* / T.$$

Контрольные вопросы

1. Какими величинами руководствуются при оценке риска?
2. Что позволяет оценить количественный анализ риска?
3. Чем характеризуются методы количественного анализа риска?
4. Какие возможности предоставляет количественный анализ опасностей?

11. ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА РИСКА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Усложнение технологий, использование широкой номенклатуры химических веществ привело к тому, что происходящие техногенные аварии стали носить всё более катастрофический характер, оказывая пагубное воздействие на здоровье людей и окружающую природную среду.

Крупные промышленные аварии 1970 – 1980-х гг. заставили законодателей и промышленников пересмотреть своё отношение к вопросам промышленной безопасности. Возникла очевидная необходимость появления законов, регулирующих специфические вопросы промышленной безопасности, которые не нормируются ни трудовым, ни экологическим правом. В 1980-е гг. стало развиваться законодательство по промышленной безопасности во многих странах (ЕС, США, Канаде, Японии). Структура систем законодательства в большинстве случаев, в том числе и в России, представляет многоступенчатую пирамиду, в вершине которой располагается Основной закон страны (Конституция) или Головной закон, имеющий либо объединяющие вопросы охраны труда, экологии, гигиены труда и промышленной безопасности. Ниже расположены законы по промышленной безопасности (не во всех странах), которые принимаются либо парламентом, либо региональными органами власти. На следующей ступени – межотраслевые нормативные документы, принимаемые правительством на основании законов. Следующая ступень – отраслевая нормативная и нормативно-техническая документация, утверждённая соответствующими компетентными государственными органами. За ними следуют различные ведомственные инструкции, положения, правила и т.д.

Основные элементы правового регулирования промышленной безопасности, составляющие национальные системы регулирования национальной безопасности, сводятся к следующим требованиям.

11.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ

Первое мероприятие в любой системе контроля за опасностями – разработка правительствами через компетентный орган соответствующих критериев, согласно которым должно определяться, какие объекты представляют наибольшую потенциальную угрозу для безопасности. В большинстве стран (США, Германии, Нидерландах, Норвегии, Великобритании, Франции) классификация промышленных объектов по опасности производится по наличию опасных веществ на объекте. Такой же подход предлагается в Директиве по Севезо и Конвенции о трансграничном воздействии промышленных аварий. В законодательных актах устанавлива-

ется перечень опасных веществ и их пороговых количеств, при превышении которых на промышленном объекте последствий относят к категории опасного. Однако в законодательной международной практике известны и другие подходы к идентификации. Например, законодательством Бельгии опасные промышленные объекты классифицируются по видам опасной деятельности (шахты и каменоломни; паровые машины; предприятия по производству взрывчатых веществ; ядерные реакторы и установки, использующие радиоактивные материалы; предприятия, производящие и использующие отравляющие вещества). В Греции используется иной классификационный признак – по видам опасности. Промышленные объекты классифицируются как опасные (возможность взрыва, пожара и т.п.), вредные для здоровья (дым, газы и т.п.), дискомфортные (шум, запах и т.д.).

11.2. ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

Необходимо определить:

- возможные сбои, неполадки и ошибки, которые могут привести к аварии, а также сценарии возможных аварий;
- необходимые превентивные технические и организационные меры, которые должен принять предприниматель во избежание аварии;
- возможные последствия аварий;
- меры, которые должны быть приняты при локализации аварии и ликвидации её последствий.

Для оценки опасности могут использоваться различные методы, такие как предварительный анализ опасности, анализ «дерева отказов» и анализ последствий аварий, оценка риска. Какой бы метод ни применялся, цель оценки опасности – определение потенциальных причин отказа в работе или аварий на промышленном объекте. В большинстве стран критерий оценки опасности – качественные показатели. В Нидерландах используют количественный показатель степени риска.

11.3. ТРЕБОВАНИЯ К РАЗМЕЩЕНИЮ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

При размещении промышленного объекта должны учитываться возможные отрицательные воздействия на окружающую среду и население. Законодательно устанавливается процедура получения разрешения на размещение промышленного объекта, обеспечивающее участие в нём государства, предпринимателя и общественности. Политика правильного размещения объекта применяется только к новым объектам. Что касается уже существующих, то она может быть направлена на ограничение развития районов в непосредственной близости от промышленных объектов.

В развитых странах, таких как Нидерланды, Бельгия, Япония, в определённых случаях правительство компенсирует населению затраты на переселение из особо техногенно опасных регионов.

11.4. СИСТЕМА ЛИЦЕНЗИРОВАНИЯ

Законодательствами многих стран предусматривается предоставление компетентным органам право ограничивать производство путём установления лицензионного порядка. В большинстве стран требования по лицензированию промышленной деятельности касаются промышленных объектов, отнесённых к категории опасных.

11.5. ЭКСПЕРТИЗА ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Проведение экспертизы промышленной безопасности предусматривается на всех стадиях функционирования промышленных объектов, начиная со стадии проектирования. Декларации безопасности также могут стать объектом экспертизы. В практическом руководстве Международного бюро труда «О предупреждении крупных промышленных аварий» говорится о необходимости проведения экспертиз промышленных объектов. Они могут проводиться как в обязательном порядке в соответствии с действующим законодательством, так и по поручению специально уполномоченных органов, местных органов власти или общественности.

11.6. ИНФОРМИРОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ОРГАНОВ И ОБЩЕСТВЕННОСТИ ОБ ОПАСНОСТЯХ И АВАРИЯХ

По оценке западных специалистов, одно из наивысших достижений демократии – «право общественности на информацию о вредном воздействии» (Community Right-to-Know), внесённое в США в раздел 313 части 111 Закона о поправках к Суперфонду (1986). Эта информация должна включать описание:

- установки – объекта потенциальной опасности;
- потенциально опасных видов деятельности, опасных используемых веществ и методов контроля за ними;
- способов оповещения о чрезвычайных ситуациях;
- действий населения, принимаемых в случае чрезвычайных ситуаций;
- известного воздействия на людей в результате происшедших ранее аналогичных аварий;
- мер, которые необходимо принимать в случае поражения в результате аварии.

Рекомендации по определению территории вокруг объекта, на которой население необходимо информировать о нём, могут дать эксперты,

проводившие экспертизу опасности. Информация должна периодически повторяться и при необходимости дополняться, обновляться с учётом возможных процессов миграции населения. В странах, где введена процедура декларирования безопасности, указанная информация для опасных промышленных объектов предоставляется в составе декларации безопасности.

Местные власти и администрация должны проверять, насколько такая информация доходит до людей и полно ими понимается. При необходимости принимать меры, направленные на усовершенствование этой работы.

Во время чрезвычайных ситуаций администрация должна информировать население, проживающее вблизи опасного объекта, о развитии аварии, результатах расследования причин возникновения чрезвычайной ситуации и возможном ближайшем или долгосрочном воздействии последствий аварии на население и окружающую среду.

11.7. ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Вопросы ответственности администрации предприятия регулируются во всём блоке законодательства, касающегося вопросов охраны окружающей среды, труда и обеспечения промышленной безопасности. Эти вопросы обычно рассматриваются в головных законодательных актах. В США – это закон «О профессиональной безопасности и здравоохранении», в России – это «Закон об охране окружающей среды», в Великобритании – закон «Об обеспечении охраны труда и здоровья», в Нидерландах и Норвегии – закон «Об охране окружающей предприятие природной среды» и т.д. Усиление ответственности предприятий, на которых производят, перевозят, обрабатывают или хранят опасные вещества, регулируется в поправках 1990 г. к Закону США «О чистом воздухе». Администрация промышленных объектов несёт ответственность за проектирование и безопасную эксплуатацию установки, происшедшие аварии и сведение к минимуму их последствий. Ответственность за последствия аварий по западному законодательству наступает вне зависимости от вины.

11.8. УЧЁТ И РАССЛЕДОВАНИЕ

При проведении оценки опасности и составлении декларации безопасности необходимо учитывать опыт всех происшедших аварий, анализировать причины их возникновения. Поэтому требование учёта и расследования аварий – обязательный элемент законодательства по промышленной безопасности. Информацию об авариях администрация промышленного объекта обязана предоставлять в компетентные органы власти. Здесь следует отметить, что учёту и расследованию причин мелких ава-

рий придаётся большое значение, поскольку любая мелкая авария при определённом стечении обстоятельств может привести к катастрофическим последствиям. В Европейском сообществе ведётся банк данных по учёту аварий. Члены ЕЭС обязаны предоставлять туда информацию о происшедших авариях. Такое требование тоже содержится и в национальных законодательных актах. Например, в Законе ФРГ «Об аварийных ситуациях» указано, что владелец установки обязан сообщить в компетентные органы об аварии, а также не позднее чем в недельный срок сообщить о причинах аварии и мерах, принятых для её локализации и ликвидации её последствий.

11.9. УЧАСТИЕ ОРГАНОВ МЕСТНОГО САМОУПРАВЛЕНИЯ И ОБЩЕСТВЕННОСТИ В ПРОЦЕССАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Большое внимание в законодательстве развитых стран уделяется участию местных органов власти и общественности в регулировании промышленной деятельности. Они могут повлиять на решение о размещении промышленного объекта, принимать участие в информировании граждан об опасных объектах и авариях, которые могут нанести ущерб населению, в подготовке к действиям во время аварий и чрезвычайных ситуаций. В США разработана такая система, которую в настоящее время пытаются адаптировать и в других странах, в частности в России. В ней детально разработан механизм участия местных органов и общественности в регулировании промышленной безопасности.

11.10. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ И НАДЗОР ЗА ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Любая система надзора и контроля объектов повышенной опасности должна строиться на государственном уровне, т.е. должен существовать специальный орган (или органы), ответственный за промышленную безопасность и охрану труда. В России, например, Госатомнадзор РФ – государственная организация, занимающаяся надзором за безопасной эксплуатацией объектов ядерной энергетики (АЭС, АСТ, АТЭЦ и др.), во Франции – служба промышленной экологии и Бюро оценки риска и промышленного загрязнения, в Норвегии – Государственный орган по борьбе с загрязнениями и Директорат по предотвращению пожаров и взрывов.

Госатомнадзор РФ организует и осуществляет государственное регулирование и надзор за безопасностью при производстве, обращении и использовании в мирных и оборонных целях атомной энергии, ядерных материалов, радиоактивных веществ и изделий на их основе с це-

лю обеспечения безопасности персонала ядерно- и(или) радиационно-опасных объектов и населения, защиты окружающей среды и интересов безопасности РФ.

Госатомнадзор РФ в пределах своей компетенции принимает решения, обязательные для органов государственного управления и предприятий, расположенных на территории РФ, независимо от их подчинённости и форм собственности, а также должностных лиц и граждан.

Конкретные задачи, функции и права Госатомнадзора РФ предусмотрены Положением о нём. В частности, Госатомнадзор РФ имеет право запрещать применение изделий и технологий, не обеспечивающих ядерную и радиационную безопасность персонала, населения и окружающей среды, привлекать к административной ответственности должностных лиц министерств и ведомств, органов исполнительной власти, предприятий, виновных в нарушении требований, правил, норм ядерной и радиационной безопасности.

Основной задачей Госэнергонадзора в РФ является осуществление контроля за техническим состоянием и безопасным обслуживанием электрических и теплоиспользующих установок потребителей электрической и тепловой энергии, рациональным и эффективным использованием электрической и тепловой энергии на предприятиях, в организациях и учреждениях независимо от их ведомственной принадлежности и форм собственности.

В России Государственный надзор за соблюдением правил по безопасному ведению работ в отдельных отраслях промышленности и на некоторых объектах осуществляется **Государственным комитетом РФ по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору (Госгортехнадзор РФ)** и его местными органами. Надзор осуществляется в угольной, горнорудной, горнохимической, нерудной, нефтедобывающей и газодобывающей, химической, металлургической и нефтеперерабатывающей промышленности, в геологоразведочных экспедициях и партиях, а также при устройстве и эксплуатации подъёмных сооружений, котельных установок и сосудов, работающих под давлением, трубопроводов для пара и горячей воды, объектов, связанных с добычей, транспортировкой, хранением и использованием газа, при ведении взрывных работ в промышленности.

На Госгортехнадзор РФ возложены *следующие функции*:

– организация и осуществление государственного регулирования промышленной безопасности и государственного надзора за соблюдением центральными органами федеральной исполнительной власти, предприятиями, объединениями и организациями, независимо от их организационно-правовых форм, должностными лицами и гражданами требований по безопасному ведению работ в промышленности, устройству и безопасной эксплуатации оборудования;

– организация и осуществление государственного горного надзора в целях обеспечения соблюдения всеми пользователями недр законодательства РФ, утверждённых в установленном порядке;

– требование (правил и норм) безопасного ведения работ, предупреждения и устранения их вредного влияния на население, окружающую природную среду, объекты народного хозяйства, а также по охране недр;

– разработка и осуществление совместно с центральными органами федеральной исполнительной власти, органами исполнительной власти республик в составе РФ, краёв, областей, автономных образований, местными администрациями, а также с предприятиями, объединениями и организациями мер по профилактике аварий и производственного травматизма;

– установление требований (правил и норм) по безопасному ведению работ, изготовлению и безопасной эксплуатации оборудования, а также по охране недр и переработке минерального сырья;

– осуществление лицензирования отдельных видов деятельности, связанных с повышенной опасностью промышленных производств (объектов) и работ, а также обеспечением безопасности при использовании недрами;

– участие в разработке и контроль за реализацией научно-технических программ по приоритетным направлениям обеспечения безопасности промышленных производств, персонала и населения;

– обобщение практики применения законодательства РФ в области безопасности ведения работ в промышленности, охраны и использования недр, применения взрывчатых материалов в народном хозяйстве и разработка предложений по его совершенствованию.

Госгортехнадзор РФ осуществляет государственное регулирование и надзор на территории РФ через образуемые им региональные органы (округа).

Госгортехнадзору РФ предоставлено право:

– проводить беспрепятственно проверки подконтрольных предприятий и объектов по вопросам, относящимся к его компетенции, а также привлекать по согласованию с центральными органами федеральной исполнительной власти, объединениями и предприятиями их специалистов для проведения указанных проверок, получать необходимые объяснения, справки и сведения по возникающим вопросам;

– вносить в центральные органы федеральной исполнительной власти предложения и давать руководителям предприятий, объединений, организаций и гражданам, а также подразделениям местных администраций, имеющих подконтрольные Госгортехнадзору РФ объекты, обязательные для исполнения указания (предписания) об устранении выявленных на-

рушений условий действия разрешений (лицензий), требований (правил и норм) по безопасному ведению работ, хранению и использованию взрывчатых материалов, а также по разработке, устройству, изготовлению и безопасной эксплуатации технологических процессов и оборудования, охране недр.

Основная задача подобных органов – контролировать соблюдение требований действующего законодательства в области экологической и промышленной безопасности. На предприятиях должны находиться специально уполномоченные лица или органы, контролирующие соблюдение требований промышленной безопасности, что закрепляется законодательно.

Контрольные вопросы

1. Какой орган в РФ является ответственным за промышленную безопасность?
2. Что необходимо учитывать при проведении оценки опасности и составлении декларации безопасности на опасном промышленном объекте (ОПО)?
3. Каким путём можно ограничивать производственную деятельность ОПО?
4. В чём состоит основная задача контролирующих органов по отношению к ОПО?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный учебный материал свидетельствует, что высокопроизводительная и надёжная работа технологического оборудования во многом определяется его надёжностью и безотказностью и, как следствие, безопасностью в процессе его эксплуатации.

В настоящее время трудно представить себе высококвалифицированного специалиста в области промышленной безопасности, не обладающего навыками в оценке надёжности технологического оборудования и техногенного риска.

В учебном пособии рассмотрены основные положения теории надёжности технических систем и техногенного риска, элементы физики отказов, структурные схемы надёжности технических систем и их расчёт. Приведены методологии анализа и оценки техногенного риска, а также правовые аспекты управления безопасностью.

Материал, изложенный в учебном пособии, является составной частью таких учебных курсов как «Технологическое оборудование химической промышленности», «Технологическое оборудование и его безопасная эксплуатация», «Производственная безопасность», «Диагностика и ремонт технологического оборудования» и предусмотрен для изучения Государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования по направлениям подготовки дипломированных специалистов 280102 «Безопасность технологических процессов и производств», и подготовки бакалавров по направлениям 280700 «Техносферная безопасность».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федер. закон от 21.07.97 г. № 116-ФЗ.
2. ГОСТ 27.002–89. Надёжность в технике. Основные понятия, термины и определения.
3. ГОСТ 18322–78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.
4. ГОСТ 12.1.010–76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.
5. ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
6. Хенли, Э.Дж. Надёжность технических систем и оценка риска / Э.Дж. Хенли, Х. Кумамото. – М. : Машиностроение, 1984.
7. Труханов, В.М. Надёжность изделий машиностроения. Теория и практика / В.М. Труханов. – М. : Машиностроение, 1996.
8. Проников, А.С. Надёжность машин / А.С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978.
9. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надёжности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М. : Мир, 1984.
10. Надёжность и эффективность в технике : справочник / В.С. Авдуевский и др. – М. : Машиностроение, 1989.
11. Надёжность технических систем : справочник / Ю.К. Беляев и др. – М. : Радио и связь, 1985.
12. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1990.
13. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1986.
14. Воскобоев, В.Ф. Надёжность технических систем и техногенный риск. Ч. I. Надёжность технических систем / В.Ф. Воскобоев. – М. : ООО ИД «Альянс», 2008 ; ООО Изд-во «Путь», 2008. – 200 с.
15. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надёжности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М. : Наука, 1966.
16. Решетов, Д.Н. Надёжность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М. : Высшая школа, 1988.
17. Северцев, Н.А. Надёжность сложных систем в эксплуатации и обработке / Н.А. Северцев. – М. : Высшая школа, 1989.
18. Сеницын, А.П. Расчёт конструкций на основе теории риска / А.П. Сеницын. – М. : Стройиздат, 1985.
19. Райзер, В.Д. Теория надёжности в строительном проектировании / В.Д. Райзер. – М. : Изд-во АСВ, 1998.

20. Безопасность жизнедеятельности / под ред. С.В. Белова. – 3-е изд. – М. : Высшая школа, 2001.

21. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда) / П.П. Кукин и др. – М. : Высшая школа, 1999.

22. РД 03-418–01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.

23. СП 12-132–99. Безопасность труда в строительстве. Макеты стандартов предприятий по безопасности труда для организаций строительства, промышленности строительных материалов и жилищно-коммунального хозяйства.

24. Ветошкин, А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск / А.Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во ПГУАиС, 2003.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	4
2. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕСЯ В ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ	7
2.1. Закон распределения Пуассона	7
2.2. Экспоненциальное распределение	7
2.3. Нормальный закон распределения	9
2.4. Логарифмическое нормальное распределение	10
2.5. Распределение Вейбулла	12
Контрольные вопросы	14
3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ	15
3.1. Показатели надёжности невосстанавливаемого элемента	15
3.2. Показатели надёжности восстанавливаемого элемента	17
3.3. Показатели надёжности системы, состоящей из независимых элементов	20
3.4. Выбор и обоснование показателей надёжности технических систем	21
Контрольные вопросы	22
4. РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	23
4.1. Структурные модели надёжности сложных систем	23
4.2. Структурная схема надёжности системы с последовательным соединением элементов	24
4.3. Структурные схемы надёжности систем с параллельным соединением элементов	25
4.4. Структурные схемы надёжности систем с другими видами соединения элементов	27
Контрольные вопросы	29
5. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	30
5.1. Показатели безопасности систем «человек–машина»	32
Контрольные вопросы	36

6. ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ И РИСКА	37
6.1. Процедура анализа «дерева отказов»	39
6.2. Построение «дерева отказов»	40
6.3. Качественная и количественная оценка «дерева отказов»	42
6.4. Аналитический вывод для простых схем «дерева отказов»	43
6.5. «Дерево отказов» с повторяющимися событиями	45
6.6. Преимущества и недостатки метода «дерева отказов»	47
Контрольные вопросы	47
7. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	48
7.1. Конструктивные способы обеспечения надёжности	48
7.2. Технологические способы обеспечения надёжности изделий в процессе изготовления	49
7.3. Обеспечение надёжности сложных технических систем в условиях эксплуатации	50
7.4. Пути повышения надёжности сложных технических систем при эксплуатации	51
Контрольные вопросы	52
8. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРАКТИКИ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА	53
8.1. Понятие техногенного риска	53
8.2. Методология анализа и оценка риска	54
Контрольные вопросы	58
9. КАЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКА	59
Контрольные вопросы	63
10. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКА	64
Контрольные вопросы	66
11. ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА РИСКА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ	67
11.1. Классификация промышленных объектов по степени опасности	67
11.2. Оценка опасности промышленного объекта	68
11.3. Требования к размещению промышленного объекта	68
11.4. Система лицензирования	69
11.5. Экспертиза промышленной безопасности	69
11.6. Информирование государственных органов и общественности об опасностях и авариях	69
11.7. Ответственность производителей	70
11.8. Учёт и расследование	70
11.9. Участие органов местного самоуправления и общественности в процессах обеспечения промышленной безопасности	71
11.10. Государственный контроль и надзор за промышленной безопасностью	71
Контрольные вопросы	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	76

Учебное издание

ШУБИН Роман Александрович

**НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И
ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Учебное пособие

Редактор Л.В. Комбарова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 28.03.2012.

Формат 60 × 84 / 16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 50 экз. Заказ № 124

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14