

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ГОУ ВПО ЛНР «ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ТАРАСА ШЕВЧЕНКО»**

В.В. Карпов, А.В. Коваленко

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

Учебно-методическое пособие
для студентов очной формы обучения
по направлению подготовки
20.03.01 «Техносферная безопасность»

**КНИГА**
Луганск
2020

УДК 62-1/-9-049.5 (076)

ББК 30нбр3

К 26

Рецензенты:

- Изюмский В.А.* – доцент кафедры технического сервиса в АПК ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный аграрный университет», кандидат технических наук, доцент;
- Авершина А.С.* – доцент кафедры товароведения и торгового предпринимательства ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко», кандидат технических наук, доцент;
- Калайдо А.В.* – доцент кафедры технологий производства и профессионального образования ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко», кандидат технических наук.

Карпов В.В.:

К 26

Надежность технических систем и техногенный риск : учебно-методическое пособие / В.В Карпов, А.В. Коваленко; ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко». – Луганск : Книта, 2020. – 148 с.

В учебно-методическом пособии рассмотрены основные положения теории надежности изделий и различных систем, экономические показатели надежности. Представлены примеры расчета надежности систем. Даны определения теории риска.

Учебное издание предназначено для студентов очной форм обучения по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».

*Рекомендовано к печати Учебно-методическим советом Луганского национального университета имени Тараса Шевченко в качестве учебно-методического пособия для студентов очной формы обучения по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность»
(протокол № 4 от 11.12.2019)*

УДК 62-1/-9-049.5 (076)

ББК 30нбр3

© Карпов В.В., Коваленко А.В., 2020

© ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ, МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ И НАДЕЖНОСТИ.....	7
1.1 Основные понятия в теории надежности.....	7
1.2 Надежность систем.....	10
1.3 Некоторые положения теории вероятностей и математической статистики.....	11
1.3.1 Общие понятия и теоремы.....	11
1.3.2 Законы распределения случайной величины.....	13
1.3.3 Числовые характеристики случайных величин.....	18
2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ.....	20
2.1 Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов.....	21
2.1.1 Вероятность безотказной работы.....	21
2.1.2 Вероятность отказа.....	22
2.1.3 Частота отказов.....	23
2.1.4 Интенсивность отказов.....	24
2.1.5 Среднее время безотказной работы.....	27
2.2 Показатели надежности восстанавливаемых объектов.....	30
2.2.1 Параметр потока отказов.....	30
2.2.2 Нарботка на отказ.....	31
2.2.3 Среднее время восстановления объекта.....	32
2.2.4 Вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта.....	33
2.3 Показатели долговечности.....	35
2.4 Показатели сохраняемости.....	38
2.5 Экономические показатели надежности.....	39
2.6 Комплексные показатели надежности.....	40
3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТА.....	42

3.1	Теория надежности и законы распределения случайных величин.....	42
3.2	Надежность в период нормальной эксплуатации.....	44
3.3	Надежность в период постепенных отказов.....	47
3.3.1	Нормальное распределение.....	48
3.3.2	Логарифмически нормальное распределение.....	51
3.3.3	Распределение Вейбулла.....	52
3.4	Совместное действие внезапных и постепенных отказов....	55
3.5	Применимость законов распределения.....	56
4.	НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ.....	57
4.1	Структурная схема безотказности изделия.....	57
4.2	Расчет надежности последовательных систем.....	61
4.3	Расчет надежности параллельных систем.....	63
4.4	Безотказность объекта при смешанном соединении элементов.....	65
4.5	Расчет надежности сложных систем.....	66
4.6	Резерв и резервирование.....	69
4.6.1	Нагрузочное резервирование.....	70
4.6.2	Энергетическое резервирование.....	70
4.6.3	Параметрическое резервирование.....	71
4.6.4	Функциональное резервирование.....	71
4.6.5	Структурное резервирование.....	71
4.7	Эффективность резервирования.....	75
4.8	Определение надежности объекта при помощи метода логических схем.....	78
4.9	Расчет надежности методом дерева отказов.....	80
4.10	Схемная надежность изделия.....	85
4.11	Надежность восстанавливаемых систем.....	87
4.11.1	Надежность систем с основным соединением элементов....	87
4.11.2	Надежность систем с резервированным соединением.....	89
4.12	Надежность систем с плановым техническим обслуживанием.....	90
5.	МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ.....	92

5.1	Особенности приложения теории надежности к вопросам прочности.....	92
5.2	Нагрузки в механических системах.....	94
5.3	Распределение несущей способности элементов.....	95
5.3.1	Статистические данные о материалах.....	95
5.3.2	Статистические данные о геометрических размерах.....	97
5.4	Методы расчета надежности.....	98
5.4.1	Расчет по допускам напряжения.....	98
5.4.2	Расчет по методу предельных состояний.....	99
5.4.3	Вероятностный метод расчета.....	100
6.	ИСПЫТАНИЯ МАШИН НА НАДЕЖНОСТЬ.....	112
6.1	Виды и методы испытания машин на надежность.....	112
6.2	Испытания на надежность.....	113
6.2.1	Испытания серийных машин на надежность.....	114
6.2.2	Ресурсные испытания машин.....	114
6.2.3	Испытания машин после ремонта.....	115
6.2.4	Ускоренные испытания.....	115
7.	НАДЕЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	117
7.1	Надежность зубчатых передач.....	118
7.2	Надежность подшипников качения.....	121
8.	ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ РИСКА.....	123
8.1	Определение риска.....	124
8.2	Приемлемый риск.....	125
8.3	Техногенный риск	126
8.4	Экономические методы управления риском.....	127
8.5	Расчет риска.....	128
8.5.1	Определение величины риска сокращения продолжительности жизни от воздействия радиоактивного загрязнения.....	128
8.5.2	Определение величины риска заболевания профессиональной вибрационной болезнью.....	130
	Перечень вопросов для подготовки к экзамену по дисциплине «Надежность технических систем и техногенный риск».....	133

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	135
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	136
ГЛОССАРИЙ.....	139

ВВЕДЕНИЕ

Качество промышленной продукции, т.е. совокупность свойств, обуславливающих ее способность удовлетворять определенные потребности, тесно связана с надежностью, которая превратилась сегодня в проблему номер один современной техники.

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

В настоящее время существует два основных подхода к оценке надежности технических систем:

функциональный – при этом подходе о надежности конкретного изделия судят по величинам, определяющим его состояние, например, температура, вибрация, мощность, КПД, шумовая характеристика и т.д.;

вероятностно-статистический – в этом случае рассматривается и оценивается не конкретный образец техники, а среднестатистический, вероятность его пребывания в том или ином состоянии.

Однако диагностирование состояния всех элементов машин, на настоящем этапе развития, является неразрешимой задачей, что предопределяет основное применение вероятностно-статистических методов в теории и практике надежности.

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Надежность технических систем и техногенный риск», в соответствии с государственным образовательным стандартом высшего образования Луганской Народной Республики по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ, МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ И НАДЕЖНОСТИ

1.1 Основные понятия в теории надежности

Основные понятия теории надежности стандартизированы ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Термины и определения» [10].

Теорией надежности называется наука, занимающаяся разработкой методов определения, контроля и обеспечения надежности техники [1,2,7].

Как и в любой другой науке, в основе теории надежности лежит ряд исходных понятий [10].

Объект – предмет познания и практической деятельности человека.

В теории надежности рассматриваются следующие обобщенные объекты:

изделие – единица продукции, выпускаемая данным предприятием, цехом и т.д., например, подшипник, двигатель, автомобиль;

элемент – простейшая при данном рассмотрении составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей, например, двигатель – это элемент автомобиля;

система – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Понятие элемента и системы трансформируется в зависимости от поставленной задачи. Станок, например, при установлении его собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, деталей и т.д., а при изучении надежности автоматической линии – как элемент.

Изделие может пребывать в одном из пяти состояний:

- работоспособном;
- неработоспособном;
- исправном;
- неисправном;
- предельном.

Работоспособность – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные

функции, соответствует требуемым. Например, автомобиль должен ездить, и, если он едет, то он работоспособен.

Неработоспособность – состояние объекта, при котором не выполняются требуемые функции. Например, автомобиль не заводится, или двигатель работает, но автомобиль не перемещается и т.д.

Исправность – состояние объекта, при котором оно удовлетворяет всем не только основным, но и вспомогательным требованиям.

Исправленное и работоспособное состояния не тождественны. Исправленное состояние включает работоспособное. Исправный объект обязательно работоспособен. Работоспособный объект может быть неисправен. Например, в работающем радиоприемнике не освещен индикатор настройки или в автомобиле не включается сигнал поворота.

Неисправность – состояние объекта, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации.

Неисправный объект может быть работоспособен, если несоответствие требованиям технической документации не касается функциональных параметров, определяющих эксплуатационные показатели объекта, например, дефект окраски, вмятины на поверхности кузова автомобиля, отсутствие ограждения, кожуха на станке и т.д.

Предельное состояние объекта – состояние, при котором его дальнейшее применение по назначению (или восстановление) недопустимо или нецелесообразно из-за неустранимого снижения безопасности или эффективности.

Выход объекта из исправного или работоспособного состояния происходит из-за следующих событий: дефект, повреждение и отказ.

Дефект – каждое отдельное несоответствие изделия требованиям нормативно-технической документации.

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

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния.

В зависимости от причин, вызвавших переход объекта из работоспособного в неработоспособное состояние, отказы бывают внезапные и постепенные.

Внезапные отказы происходят из-за:

- ошибок расчета и конструирования;
- наличия скрытых дефектов изготовления;
- нарушения правил эксплуатации;
- превышения действующей нагрузки над несущей способностью объекта.

Внезапные отказы обычно связаны с поломками деталей, появлением остаточных деформаций, потерей устойчивости, заеданием или расплавлением.

Постепенные отказы наступают при полном использовании ресурса объекта, вследствие естественного старения или изнашивания материала объекта.

Улучшение или ухудшение условий эксплуатации может лишь замедлить или ускорить появление постепенного отказа. Полностью исключить постепенные отказы можно, лишь выполнив профилактическую замену элементов, близких к предельному состоянию.

Профилактическая замена элементов является важнейшим средством повышения надежности объектов.

Возможность или невозможность обратного перехода объекта из неработоспособного в работоспособное состояние предопределяет классификацию объектов на восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

Восстанавливаемым называется объект, работоспособность которого после отказа подлежит восстановлению (например двигатель, проколота шина, система зажигания и т.д.).

Невосстанавливаемым называется объект, работоспособность которого после отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации (например, подшипник качения, ременная передача, поломанные зубья зубчатого колеса и т.д.).

Ряд изделий, относимых к невосстанавливаемым, можно восстановить, но на специализированном производстве (например, те же подшипники, зубчатые колеса и т.д.).

Комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности объекта называется **ремонтom**.

1.2 Надежность систем

Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации.

Надежность является комплексным свойством технических систем, составными элементами которого являются безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость [16, 20].

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени или наработки.

Это свойство особенно важно для машин, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей или с перерывом в работе большого комплекса машин, с остановкой автоматизированного производства или с отказом дорогого изделия. В таких случаях надежность отождествляют с безотказностью.

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

Таким образом, долговечность предусматривает перерывы в эксплуатации, обусловленные ремонтом и обслуживанием.

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособности в результате технического обслуживания и ремонта.

Ремонтпригодность определяет доступность, контролепригодность, легкосъемность, взаимозаменяемость, унификацию и т.д.

С усложнением систем все труднее становится находить причины отказов и отказавшие элементы. Так, в сложных электрогидравлических системах станков поиск причин отказа может занимать более 50% общего времени восстановления работоспособности.

Поэтому ремонтпригодность как свойство объекта:

- закладывается при разработке объекта за счет выбора рациональной конструкции;
- обеспечивается при изготовлении соблюдением технологии производства;
- поддерживается при эксплуатации рациональной системой технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять значение показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности после хранения и транспортирования.

Практическая роль этого свойства особенно велика для приборов. Так, по американским источникам во время второй мировой войны около 50% радиоэлектронного оборудования для военных нужд и запасных частей к нему вышло из строя в процессе хранения [21].

Наиболее эффективными методами повышения сохраняемости машиностроительной продукции являются: консервация, применение специальных защитных покрытий и пропитывающих составов, повышение транспортабельности, а также профилактическое обслуживание подлежащих хранению объектов.

В зависимости от вида изделия надежность его может определяться всеми или частью перечисленных свойств. Например, надежность подшипника определяется его долговечностью; ракеты-носителя – безотказностью и сохраняемостью; автомобиля – безотказностью, ремонтпригодностью и долговечностью [31].

Надежность может быть существенно повышена за счет комплексного использования известных методов:

- прогнозирования;
- обслуживания, ремонта и т.д.

1.3 Некоторые положения теории вероятностей и математической статистики

1.3.1 Общие понятия и теоремы

Совокупность факторов, определяющих надежность машины, ее сборочных единиц и деталей характеризуется случайными величинами. Соответственно все показатели надежности также являются случайными величинами. Но квалифицированно собранная и соответствующим образом обработанная статистическая информация об отказах данного типа машин в процессе их эксплуатации, дает уже достаточно достоверные сведения о надежности конкретной машины [23–25].

Позже мы рассмотрим конкретные принципы сбора и обработки такой информации.

Случайная величина – величина, которая может принять какое-либо неизвестное заранее возможное значение, зависящее от случайных факторов, которые не могут быть учтены.

Случайные величины могут быть дискретными и непрерывными.

Дискретной называется случайная величина, принимающая отдельные друг от друга возможные значения, которые можно записать в виде последовательности t_1, t_2, \dots, t_n .

В теории надежности дискретными случайными величинами являются, например, количество отказов в заданном интервале времени и др.

Непрерывной называется случайная величина, возможные значения которой непрерывно заполняют некоторый конечный или бесконечный промежуток.

К таким величинам относится, например, ресурс.

Относительное число появления событий при испытаниях характеризуется **частотой события**:

$$\bar{P}(A) = \frac{m}{n}, \quad (1.1)$$

где: m – число испытаний, когда событие произошло; n – число всех испытаний.

Например, из 10 подбрасываний монеты, 4 раза выпала решка, следовательно, частота событий (выпадение решки):

$$\bar{P}(A) = \frac{4}{10} = 0,4$$

Если устремить $n \rightarrow \infty$, получим вместо колеблющейся, в зависимости от числа наблюдений частоты $\bar{P}(A)$, точную величину – **вероятность события** $P(A)$.

Теорема сложения вероятностей. Вероятность появления какого-либо из нескольких несовместимых событий равна сумме вероятностей появления каждого из этих событий.

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_k) = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_k}{n} = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_k), \quad (1.2)$$

Следствие 1. Сумма вероятностей всех возможных событий, исчерпывающих данное явление, равна единице.

Пример. Вероятность того, что монета выпадет вверх или орлом (событие A_1) или решкой (событие A_2) из предыдущего примера:

$$P(A_1 + A_2) = \frac{4 + 6}{10} = 1 \quad (\text{или } 0,4 + 0,6 = 1).$$

Следствие 2. Сумма вероятностей двух противоположных событий равна единице:

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1, \quad (1.3)$$

где: \bar{A} – событие противоположное событию A .

Например, вероятность выпадения решки ($P(A) = 0,4$) и противоположного этому событию – выпадение орла ($P(\bar{A}) = 0,6$) в сумме дают единицу.

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

$$P(AB) = P(B) \cdot P(A/B), \quad (1.4)$$

где: $P(A/B)$ – условная вероятность зависимого события.

Теорема умножения вероятностей независимых события.
Вероятность совместного наступления независимых событий равна произведению их вероятностей:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B), \quad (1.5)$$

1.3.2 Законы распределения случайной величины

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

Установление закона распределения является необходимой процедурой для получения исходных данных расчета показателей надежности [26, 28].

Закон распределения случайной величины можно задать таблично, графически или аналитически. Первый и второй метод обычно используют для представления дискретных величин, второй и третий – непрерывных.

При табличном задании первая строка таблицы содержит возможные значения случайной величины, а вторая их вероятности (см. табл.1.1).

Таблица 1.1 – Закон распределения случайной величины

X	x_1	x_2	...	x_n
P	p_1	p_2	...	p_n

Здесь X – случайная величина, а (x_1, x_2, \dots, x_n) – ее возможные значения.

При графическом изображении закона распределения дискретных величин строят график в прямоугольной системе координат, по оси абсцисс откладывают значения X , по оси ординат – P строят точки (x_i, p_i) и соединяют их отрезками (рис. 1.1). (Частный случай – гистограмма).

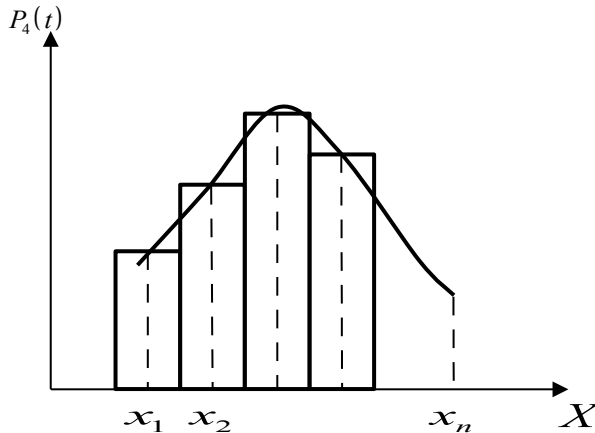


Рис. 1.1 – Графическое представление дискретных величин

Представлять подобным образом закон распределения непрерывной случайной величины, имеющей бесконечно большое число значений затруднительно, поскольку вероятность каждого такого значения близка к нулю. В этом случае следует оценивать вероятность некоторых интервалов значений, например, $P(x_1 < x < x_2)$ или $P(x_1 > x > -\infty)$ и т.д.

Поэтому закон распределения непрерывной случайной величины задают **функцией распределения** $F(x)$, ее еще называют

интегральной функцией распределения (рис. 1.2). Функция распределения определяет вероятность того, что случайная величина X в результате испытаний примет значение меньше x , т.е.

$$F(x) = P(X < x). \quad (1.6)$$

Геометрически это означает, что $F(x)$ есть вероятность того, что случайная величина X примет значение, которое изображается на числовой оси точкой, расположенной левее x .

Функция распределения обладает следующими свойствами:

- ее значения заключены на отрезке $[0,1]$, т.е. $0 \leq F(x) \leq 1$;
- функция $F(x)$ – неубывающая, т.е. $F(x_2) > F(x_1)$, если $x_2 > x_1$.

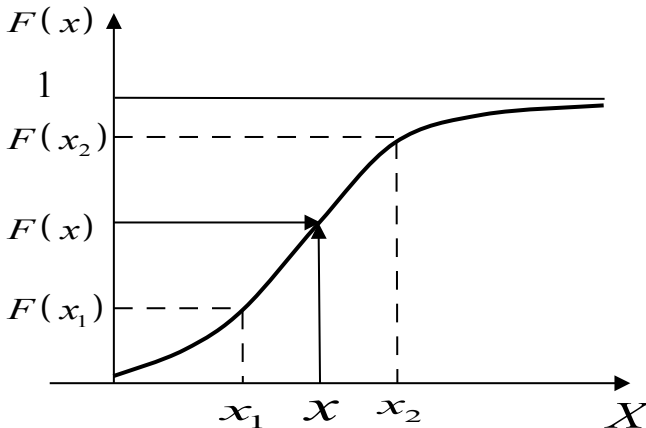


Рис. 1.2 – Функция распределения

В теории надежности оперируют наработкой (чаще временем) до возникновения отказа, т.е. некоторой случайной величиной τ , а отказ представляют как событие, состоящее в том, что $\tau < t$. В этом случае функция распределения $F(t)$ имеет физический смысл вероятности времени отказа τ , меньшего времени t :

$$F(t) = P(\tau < t). \quad (1.7)$$

Наряду с функцией распределения задания случайной величины применяют функцию **плотность распределения** (плотность вероятности) $f(x)$ (рис. 1.3).

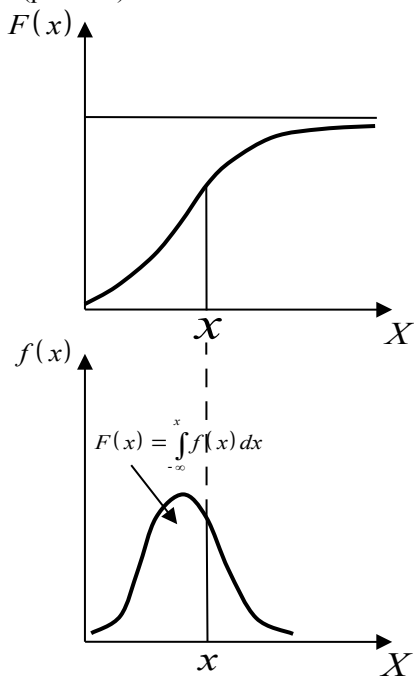


Рис. 1.3 – Плотность распределений и ее связь с функцией распределения

Плотность распределения $f(x)$ является первой производной от интегральной функции распределения:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}, \quad (1.8)$$

и обладает следующими свойствами:

– является неотрицательной функцией $f(x) \geq 0$;

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

– интеграл от плотности распределения $f(x)$ он выражает вероятность события, состоящего в том, что случайная величина примет значение, принадлежащее интервалу $(-\infty, \infty)$, в котором заключены все возможные события; такое событие достоверно, и, следовательно, вероятность его равна единице.

Эта функция играет весьма важную роль в теории надежности, так как по ее характеру можно судить о физической сущности и природе отказов изделий, что и будет показано далее.

Вероятность попадания непрерывной случайной величины в заданный интервал, например, ограниченный величинами x_1 и x_2 геометрически представляется площадью криволинейной трапеции ограниченной осью абсцисс, графиком функции $f(x)$ и прямыми x_1 и x_2 . В аналитическом виде это можно представить зависимостью:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} dF(x) = F(x) \Big|_{x_1}^{x_2} = F(x_2) - F(x_1) = P(x_1 < x < x_2). \quad (1.9)$$

Графически это отображено на рисунке 1.4.

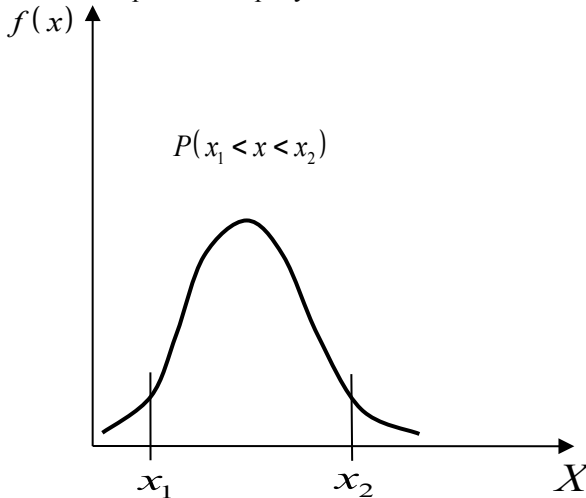


Рис.. 1.4 – Определение вероятности попадания случайной величины в некоторый интервал

В практике определения показателей надежности технических систем функции распределения получают на основе теоретических предположений или в результате наблюдений.

1.3.3 Числовые характеристики случайных величин

В некоторых случаях нет необходимости характеризовать случайную величину исчерпывающим образом с помощью законов распределения, достаточно знать наиболее существенные особенности ее распределения, которые можно выразить при помощи минимального количества числовых характеристик случайной величины [22].

Математическое ожидание – определяет центр группирования возможных значений случайной величины.

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P(x_i) \quad \text{– для дискретной случайной величины;}$$

$$M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx \quad \text{– для непрерывной случайной величины.}$$

Так как величина X является случайной, то ее истинное значение будет лежать как правее, так и левее среднего значения. Мерой разброса (рассеивания) случайной величины около его среднего значения $M(x)$ служит **дисперсия** $D(x)$ и **среднее квадратическое отклонение** σ_x .

$$D(x) = \sum_{i=1}^n P(x_i) \cdot [x_i - M(x)]^2,$$

$$D(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot [x - M(x)]^2 dx,$$

$$\sigma_x = \sqrt{D(x)}. \quad (1.10)$$

И математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение имеют размерность случайной величины.

В качестве безразмерной характеристики рассеивания случайных величин служит **коэффициент вариации** v_x :

$$v_x = \frac{\sigma_x}{M(x)}. \quad (1.11)$$

Коэффициент показывает насколько велико рассеивание по сравнению со средним значением случайной величины.

Например, при технической эксплуатации транспортных средств различают случайные величины:

- с малой вариацией $v_x \leq 0,1$;
- средней вариацией $v_x = 0,1 \dots 0,33$;
- с большой вариацией $v_x > 0,33$.

Свойства математического ожидания:

$$\left. \begin{aligned} M(a \cdot x) &= a \cdot M(x); \\ M(a + x) &= a + M(x); \end{aligned} \right\} a - \text{const.}$$

$$\left. \begin{aligned} M(x \pm y) &= M(x) \pm M(y); \\ M(x \cdot y) &= M(x) \cdot M(y); \\ M(x^2) &= [M(x)]^2 + D(x); \end{aligned} \right\} x \text{ и } y - \text{независимые случайные величины.}$$

Свойства дисперсии:

$$D(a \cdot x) = a^2 \cdot D(x);$$

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

$$D(x^2) = M(x^4) - [(M(x))^2 + \sigma_x^2]^2;$$

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

$$D(x \cdot y) = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 (M(x))^2 + \sigma_x^2 (M(y)) + \sigma_y^2.$$

Для характеристики существенных черт распределения случайной величины в компактной форме используются числовые характеристики случайной величины. В теории вероятностей числовые характеристики и операции с ними играют огромную роль. С помощью числовых характеристик существенно облегчается решение многих вероятностных задач [30].

2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность вообще нельзя измерить каким-либо прибором. О надежности изделия можно судить лишь по некоторым признакам, называемым *критериями надежности*. Численные значения критерия называются количественной характеристикой (*показателями*) надежности [33].

Показатели надежности, характеризующие все свойства, ее обуславливающие, являются статистико-вероятностными. Сама же надежность объекта зависит от условий эксплуатации. Например, по испытаниям грузового автомобиля один и тот же элемент – рессора – имел долговечность свыше 150 тыс. км на асфальтобетонном шоссе и менее 10 тыс. км на проселочных дорогах. Поэтому показатели надежности имеют смысл только в том случае, если оговорены условия эксплуатации, для которых они получены или заданы.

Количественные характеристики позволяют сравнивать варианты технических устройств по надежности, оценивать срок службы изделия, необходимое количество запасных частей, частоту профилактических осмотров и ремонтов и т.п. [33].

2.1 Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов

Целый ряд объектов работает до первого отказа, после чего их заменяют новыми. К таковым относятся, например, подшипники качения, тросы, радиодетали, ракеты и т.п. Для них понятия безотказность, долговечность и надежность оказываются эквивалентными и играют определяющую роль [34].

Основные показатели безотказности невосстанавливаемых объектов:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- вероятность отказа $Q(t)$;
- частоты отказов $a(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- среднее время безотказной работы T_{cp} .

Для определения показателей безотказности необходимо знать распределение отказов как случайных величин $f(t)$ или $F(t)$.

2.1.1 Вероятность безотказной работы

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

$$P(t) = \int_T^{\infty} f(t) dt \quad P(t) = \int_{\tau}^{\infty} f(t) dt \quad (2.1)$$

Т.е. вероятность безотказной работы есть вероятность того, что время T от момента начала работы до отказа будет больше или равно времени τ , в течение которого $P(t)$ определяется, и равна относительной площади под кривой $f(t)$, справа от значения τ (рис. 2.1).

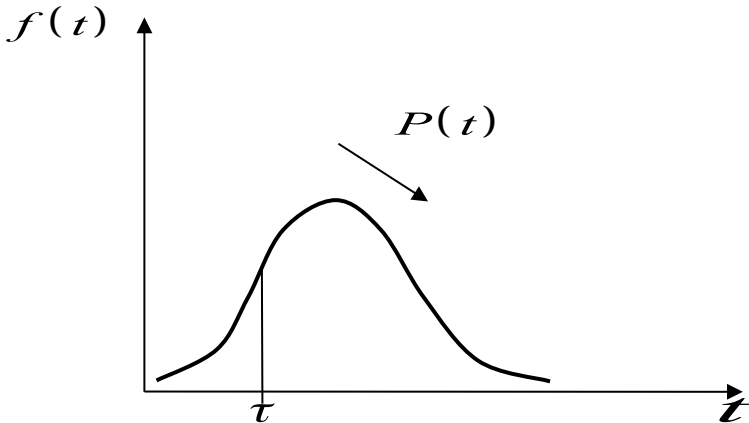


Рис. 2.1 – Геометрическая интерпретация определения вероятности безотказной работы

Например, если $P(t)$ в течение $T=1000$ часов считается равной $P=0,95$, то это означает, что из большого количества машин в среднем около 5% потеряют свою работоспособность раньше, чем через 1000 часов работы.

Вероятность безотказной работы можно оценить статистически как отношение числа объектов, проработавших весь заданный период

без отказа, к общему числу объектов, поставленных на испытание [32, 33].

$$\bar{P}(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (2.2)$$

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

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

2.1.2 Вероятность отказа

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

$$Q(t) = F(t). \quad (2.3)$$

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

$$Q(t) + P(t) = 1 \quad \text{и} \quad Q(t) = 1 - P(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (2.4)$$

Геометрически, на графике плотности распределения вероятность отказа можно представить следующим образом (рис. 2.2).

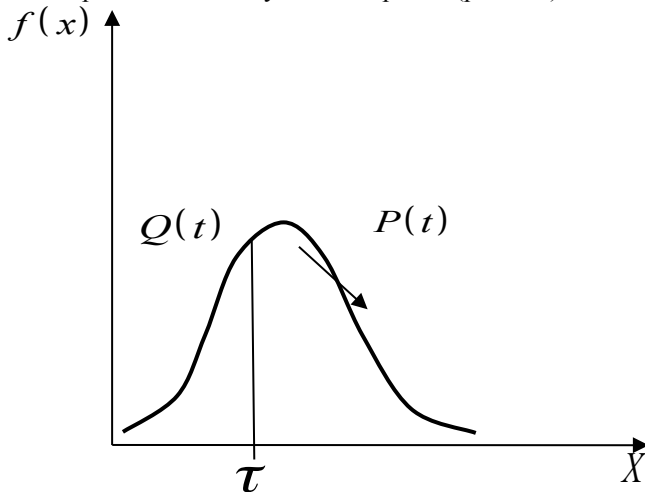


Рис. 2.2 – Геометрическая интерпретация определения вероятности отказа

Статистическая оценка вероятности отказа $\bar{Q}(t)$:

$$\bar{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}. \quad (2.5)$$

Вероятность безотказной работы, при которой объект считается надежным, зависит от его назначения. Так, для большинства механических систем обычно считается приемлемым уровень надежности, обеспечивающий вероятность безотказной работы около 0,95...0,96 [34].

Для космических систем вероятность безотказной работы должна быть: $Q(t) < 10^{-5} \dots 10^{-6}$.

2.1.3 Частота отказов

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

$$a(t) = f(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} = - \frac{dP(t)}{dt}. \quad (2.6)$$

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

$$\bar{a}(t) = f(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}. \quad (2.7)$$

Типичная кривая изменения частоты отказов объекта во времени приведена на рисунке 2.3.

На кривой частоты отказов $a(t)$ можно выделить три участка:

- 0 - t_1 – приработка;
- t_1 - t_2 – нормальная эксплуатация (внезапные отказы);
- t_2 - t_3 – предельное состояние.

Уменьшение частоты $a(t)$ на втором участке обусловлено не повышением надежности, а уменьшением общего числа испытываемых объектов. Кроме того, в период предельного состояния

кривая $a(t)$ имеет максимум, после чего частота отказов уменьшается, это объясняется опять же не повышением надежности в целом, а незначительным количеством исправно работающих к этому времени элементов [31-34].

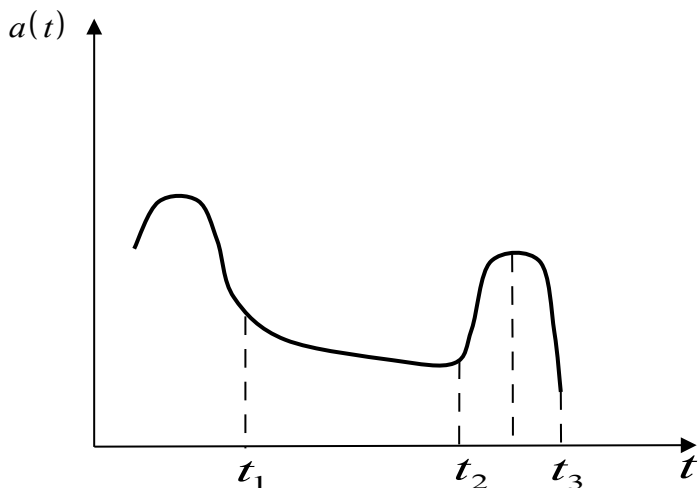


Рис. 2.3 – Частота отказов $a(t)$

Через частоту отказов выражают:

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

$$P(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt = \int_t^{\infty} a(t) dt. \quad (2.8)$$

При исследовании надежности технических систем и определении частоты отказов приходится оперировать различными случайными величинами. Для их описания с достаточной степенью точности можно использовать специально разработанные статистические модели [10, 31-34].

2.1.4 Интенсивность отказов

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

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

Условная вероятность появления отказа в единицу времени на интервале Δt :

$$\frac{F_t(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t) \cdot \Delta t} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{(1 - F(t)) \cdot \Delta t}. \quad (2.9)$$

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

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

или

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{(1 - F(t)) \cdot \Delta t} = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (2.10)$$

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

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t) \cdot \Delta t} = \frac{n(\Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}, \quad (2.11)$$

где: $N(t)$ - число работоспособных объектов в момент времени t :

$$N(t) = N - n(t). \quad (2.12)$$

Кривая интенсивности отказов, как и кривая частоты отказов, имеет три характерных участка (рис. 2.4).

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

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

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

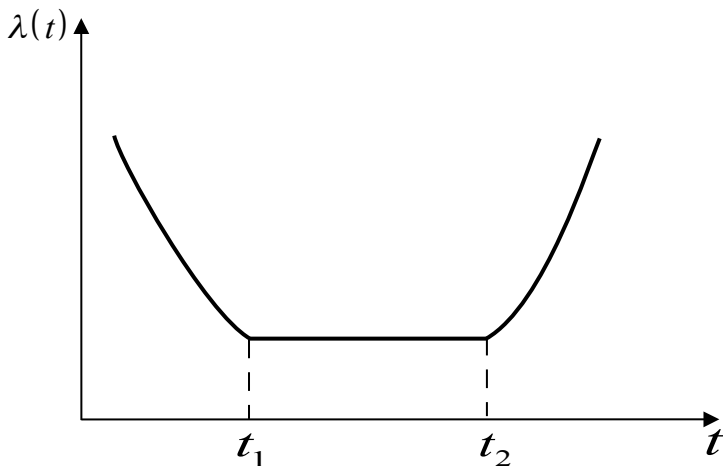


Рис. 2.4 – График интенсивности отказов

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – удобный показатель безотказности объекта, т.к. упрощает многие расчеты.

Выразим вероятность безотказной работы через интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} \rightarrow -\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)} = \ln P(t) - \ln P(0) = \ln P(t), \quad (2.13)$$

откуда:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (2.14)$$

На участке, где $\lambda(t) = \text{const}$ (см. рис. 2.4):

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.15)$$

Аналогично выражается и частота отказов:

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

ли

$$a(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt},$$

и

при $\lambda(t) = \text{const}$ $a(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$.

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

2.1.5 Среднее время безотказной работы

Среднее время безотказной работы – это математическое ожидание времени работы изделия до отказа (2.16):

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot \left(-\frac{dP(t)}{dt} \right) dt = - \int_0^{\infty} t \cdot dP(t) = -t \cdot P(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.16)$$

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

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.17)$$

Геометрически, среднее время безотказной работы выражается площадью фигуры, ограниченной осями координат $P(t)$ и кривой, что изображено на рисунке 2.5.

Среднее время безотказной работы также выражается через интенсивность отказов:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} dt, \quad (2.18)$$

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

п

Статистическая оценка $\lambda(t)$ формируется следующим выражением (2.19):

$$\bar{T}_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (2.19)$$

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

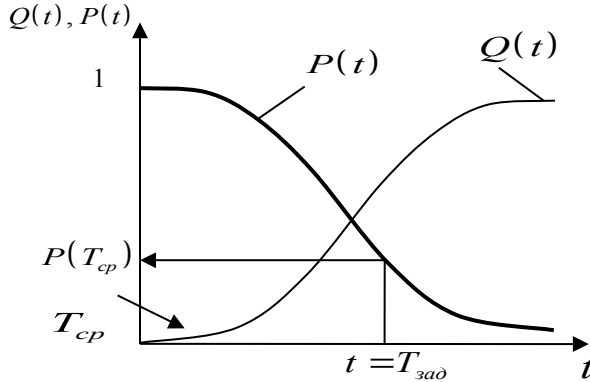


Рис. 2.5 – Геометрическая интерпретация определения среднего времени безотказной работы

Пример. При испытании 10 систем получены следующие данные выхода из строя:

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

Решение:

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

В виду того, что время испытаний бывает весьма продолжительным, а также при значительном количестве испытываемых объектов пользуются упрощенной зависимостью. Для этого временной интервал t_k , в течение которого из строя вышли все испытываемые объекты разбивают на части $\Delta t = t_j - t_{j-1}$, в

количестве $m = t_k / \Delta t$, здесь t_j, t_{j-1} – время конца и начала j -го интервала. Характеристикой интервала выступает среднее значение $t_{cpj} = (t_{j-1} + t_j) / 2$.

Имея данные о количестве вышедших из строя объектов Δn_j в каждом из J -х интервалов времени рассчитывают статистическую оценку T_{cp} :

$$\bar{T}_{cp} \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m \Delta n_j \cdot t_{cpj}. \quad (2.20)$$

Основным достоинством данного показателя надежности является его простота вычисления на основе экспериментальных статистических данных (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Соотношения между показателями безотказности невосстанавливаемых объектов

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

Но надо понимать, что $\lambda(t)$, как математическое ожидание случайной величины, не может полностью охарактеризовать время безотказной работы объекта, необходимо знать по крайней мере дисперсию времени отказа.

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

2.2 Показатели надежности восстанавливаемых объектов

В эксплуатации любых объектов наблюдаются следующие периоды: работа, перерыв в работе, техническое обслуживание, восстановление работоспособности после отказа. При эксплуатации восстанавливаемых объектов типичным является случайный поток событий, в котором упомянутые события следуют одно за другим в случайные моменты времени [36].

Мы будем рассматривать лишь потоки однородных событий, различающихся только моментами появления. Такими потоками в системе эксплуатации являются поток отказов и поток восстановления работоспособности.

Поток однородных событий наглядно изображается последовательностью точек на числовой оси времени, соответствующих местам появления событий (отказов или восстановлений).

Из анализа потока отказов определяются следующие характеристики безотказности восстанавливаемых объектов:

- параметр потока отказов, $\omega(t)$;
- наработка на отказ, T_0 ;
- среднее время восстановления, $T_{в.ср}$;
- вероятность безотказной работы, $P_r(t)$.

2.2.1 Параметр потока отказов

Параметр потока отказов $\omega(t)$ характеризует среднее число отказов ремонтируемого объекта в единицу времени (рис. 2.6).

По результатам статистической информации параметр потока отказов определяется как отношение числа отказавших в единицу

времени объектов к числу испытываемых объектов при их мгновенном восстановлении (2.21):

$$\bar{\omega}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N n_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N n_i(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (2.21)$$

где: N – число испытываемых объектов; $n_i(t)$ – число отказов каждого объекта до наработки t ; $n_i(t + \Delta t)$ – число отказов каждого объекта до наработки $t + \Delta t$; $n_i(\Delta t)$ – число отказов каждого объекта за время Δt .

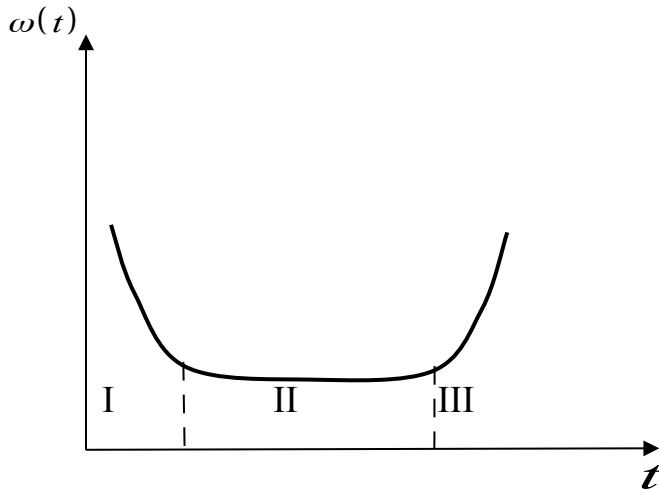


Рис. 2.6 – Поток отказов

Изменение параметра потока отказов $\omega(t)$ за время эксплуатации, как и изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$, делится на те же три периода, при этом период нормальной эксплуатации характеризуется примерно постоянным значением параметра $\omega(t)$ при неизменных условиях эксплуатации [36].

2.2.2 Нарботка на отказ

Наработка на отказ (среднее время между отказами) – отношение наработки объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Статистически наработка на отказ определяется как отношение суммы времени безотказной работы t_i между соседними отказами к числу отказов n в рассматриваемый период работы объекта:

$$\bar{T}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}. \quad (2.22)$$

Если рассматривается N объектов, то:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} t_i. \quad (2.23)$$

Поскольку вероятность безотказной работы объекта в период нормальной эксплуатации имеет экспоненциальное распределение, то:

$$P(t) = e^{-\omega t}. \quad (2.24)$$

Наработка на отказ в этот же период:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\omega t} dt = \frac{1}{\omega}, \quad (2.25)$$

т.е. равна величине, обратной параметру потока отказов.

2.2.3 Среднее время восстановления объекта

По результатам статистической информации среднее время восстановления объекта определяется по формуле:

$$\bar{T}_{всп} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{всп i}, \quad (2.26)$$

где m – число отказов объекта; $t_{всп i}$ – время затрачиваемое на отыскание и устранение одного отказа.

Интегральная функция вероятностей времени восстановления работоспособности $F_{всп}(t)$ имеет вид:

$$F_{всп}(t) = P(T_{всп} < t) = 1 - e^{-\omega t}, \quad (2.27)$$

где T_g – время восстановления объекта; μ – интенсивность восстановления работоспособности объекта – аналогична параметру потока отказов, является постоянной величиной и характеризует среднее число восстановления ремонтируемого объекта в единицу времени:

$$\mu = \frac{\Delta m(t)}{N \cdot \Delta t}.$$

Плотность вероятности будет равна:

$$f_g(t) = \frac{dF_g(t)}{dt} = \mu \cdot e^{-\mu t}.$$

Тогда интенсивность восстановления работоспособности будет равна:

$$\mu = \frac{f_g(t)}{e^{-\mu t}} = \frac{f_g(t)}{1 - F_g(t)}. \quad (2.28)$$

Среднее время восстановления определяется по формуле:

$$T_{гср} = \int_0^{\infty} P_g(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - F_g(t)) dt = \int_0^{\infty} e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu}. \quad (2.29)$$

Вероятность восстановления работоспособности за заданное время t будет определяться по формуле:

$$P_g(t) = \int_0^t f_g(t) dt, \quad (2.30)$$

При статистической оценке:

$$\bar{P}_g(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (2.31)$$

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

2.2.4 Вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта

Оценка надежности восстанавливаемого объекта не будет полной без одновременного учета времени работы до отказа и последующего времени на восстановление работоспособности. Таким показателем надежности может быть вероятность безотказной работы с учетом ремонтпригодности объекта [33-36].

Вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта $P_r(t)$ есть вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа не произойдет или вероятность того, что объект в любой момент времени будет работоспособен.

Восстанавливаемый объект в произвольный период t , $t + \Delta t$ будет в работоспособном состоянии в конце интервала Δt только при выполнении двух несовместимых событий.

Событие A – объект работоспособен в момент t и за интервал Δt не откажет. Вероятность этого:

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

Событие B – объект к моменту времени t отказал, но за интервал Δt восстановлен. Вероятность этого:

$$P_B(t, t + \Delta t) = (1 - P(t)) \cdot F_g(\Delta t) = (1 - P(t)) \cdot (1 - e^{-\mu \Delta t}).$$

Так как события A и B несовместимые, то вероятность того, что объект, в расчетный период, будет находиться в работоспособном состоянии определится по формуле

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

Показательные функции разложим в ряд, оставив только первые члены разложения:

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

тогда:

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

преобразуем выражение к виду:

$$\frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = -\lambda P(t) - \mu P(t) + \mu.$$

Применив предельный переход для $\Delta t \rightarrow 0$, получим дифференциальное уравнение

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

Решение этого уравнения определит вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта $P_r(t)$:

$$P_r(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (2.32)$$

Сравним вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта и невосстанавливаемого (см. рис. 2.7).

Напомним, что для невосстанавливаемого изделия для случая $\lambda(t) = \lambda = const$, вероятность безотказной работы определяется формулой $P(t) = e^{-\lambda t}$.

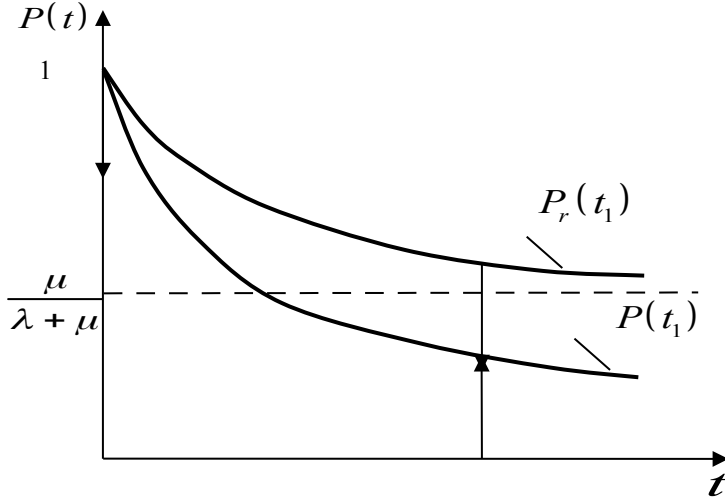


Рис. 2.7 – Сравнительный график вероятности безотказной работы восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов

Из графика видно (рис. 2.7), что вероятность безотказной работы от времени работы для восстанавливаемых объектов выше, чем невосстанавливаемых, т.е. $P_r(t_1) > P(t_1)$.

2.3 Показатели долговечности

Долговечность – свойство объектов сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов [33-36].

Переход в предельное состояние определяется моментом, когда дальнейшая эксплуатация объекта не целесообразна из-за

невозможности поддержания безопасности, безотказности или эффективности эксплуатации на допустимом уровне или, когда в результате изнашивания и старения объект пришел в такое состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает восстановления требуемой работоспособности.

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

Для оценки долговечности объекта применяют показатели, характеризующие выход за допустимые пределы основных технических характеристик (мощность, скорость, точность, КПД и др.) или способность выполнять свои функции с допустимыми затратами на обслуживание и ремонт. К числу таких показателей относят срок службы и ресурс [36].

Срок службы T_{cl} – это календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала (или возобновления после капитального ремонта) до наступления предельного состояния.

Ресурс T_p – это наработка объекта от начала эксплуатации (или возобновления после капитального ремонта) до наступления предельного состояния.

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

Рассмотрим разновидности ресурса и срока службы.

Назначенный ресурс T_{pn} – суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от технического состояния.

Средний ресурс T_{pcp} (или **средний срок службы** T_{clcp}) – среднее значение ресурса (срока службы) совокупности объектов одного типоразмера и использования.

Статистически эти показатели определяются аналогично наработкам на отказ:

$$T_{pcpj} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_{pj}, \quad \left. \vphantom{T_{pcpj}} \right\} \quad (2.33)$$

$$T_{сл\ p\ j} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_{сл\ j},$$

где $T_{p\ j}$ – ресурс, $T_{сл\ j}$ – срок службы j -го объекта.
В общем случае

$$T_{p\ ср} = \int_0^{\infty} t \cdot f_p(t) dt,$$

$$T_{сл\ ср} = \int_0^{\infty} t \cdot f_{сл}(t) dt,$$

где $f_p(t)$, $f_{сл}(t)$ – плотность распределения ресурса (срок службы).

Гамма-процентный ресурс – наработка, в течение которой изделия не достигает предельного состояния с заданной вероятностью \mathcal{Y} .

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

$$P(T_{p\ \mathcal{Y}}) = \frac{\mathcal{Y}\%}{100} = P(T_p > T_{p\ \mathcal{Y}}) = \int_{T_{p\ \mathcal{Y}}}^{\infty} f_p(t) dt. \quad (2.34)$$

Гамма-процентное значение ресурса можно определить по интегральной $F_p(t)$ и дифференциальной $f_p(t)$ функциям (рис. 2.8).

При высоких требованиях к надежности объекта задаются допустимым значением $P(t) = \gamma\%$ ($\gamma\%$ – вероятность безотказной работы объекта в %) и определяют время работы объекта $t = T_\gamma$, соответствующее данной регламентированной вероятности безотказной работы.

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 [23-26].

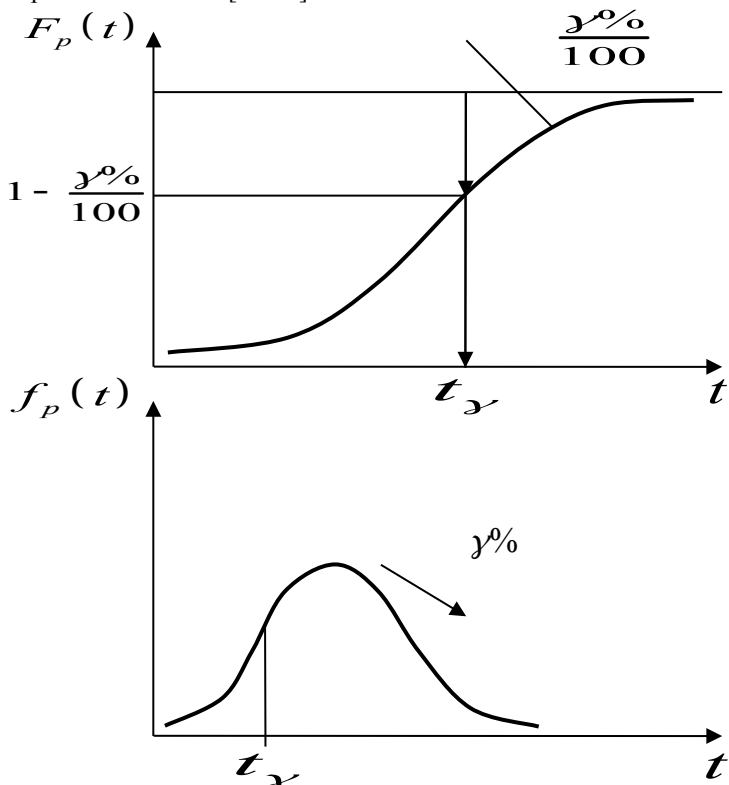


Рис. 2.8 – Определение гамма-процентного ресурса

Значение T_γ называется «гамма-процентным ресурсом» и по его значению судят о большей или меньшей безотказности и безопасности объектов.

2.4 Показатели сохраняемости

При хранении и транспортировке объекта причины, обуславливающие возникновение отказов, связаны обычно с воздействием окружающей среды и времени. Это может приводить к

отказам вследствие коррозии металлических деталей и старения резиновых, окисления, высыхания, расслоения и т.д. Подобные воздействия требуют регламентных работ и проверок, восстановительных работ по устранению отказов [23-26, 36].

Показателями сохраняемости служат следующие параметры.

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

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

$$T_{cc} = \int_{t_1}^{t_2} t \cdot f_c(t) dt. \quad (2.35)$$

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

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

2.5 Экономические показатели надежности

Экономические показатели при оценке надежности весьма важны, т.к. повышение безотказности и долговечности машин, с одной стороны, связано с дополнительными материальными затратами, а с другой – с уменьшением затрат общественного труда на ремонт и обслуживание техники, с устранением потерь от простоя машин в ремонте [32].

Показателем надежности $K_э$ (**коэффициент экономичности**) с экономической точки зрения может служить сумма затрат, связанных с

изготовлением и эксплуатацией машины, отнесенная к длительности ее эксплуатации:

$$K_3 = \frac{Q_u + Q_3}{T_3}, \quad (2.36)$$

где Q_u – стоимость изготовления новой машины, руб.;
 Q_3 – суммарные затраты на эксплуатацию, ремонт и обслуживание машины; T_3 – период эксплуатации, ч.

Следует стремиться к минимизации коэффициента экономичности K_3 .

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

$$K_{из} = \frac{Q_u}{Q_u + Q_3} \quad (2.37)$$

Более высокая надежность достигается за счет дополнительных затрат. В связи с этим часто используют показатель **цены надежности** Q_n . Для прогнозирования затрат на повышение надежности в ряде случаев применяют метод сравнения с прототипом на основании общих эмпирических зависимостей типа:

$$Q_n = Q_{но} \left(\frac{T_0}{T} \right)^a, \quad (2.38)$$

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

2.6 Комплексные показатели надежности

Единичные показатели безотказности такие, как параметр потока отказов и наработка на отказ восстанавливаемых объектов не учитывают время, затрачиваемое на восстановление. Поэтому эти

показатели не дают возможности оценить готовность к выполнению заданных функций в нужное время.

Для комплексной оценки надежности технических систем и эффективности технической эксплуатации в теории надежности используют коэффициенты готовности, оперативной готовности, технического использования и простоя [20, 22-26].

Коэффициент готовности – вероятность работоспособного состояния восстанавливаемого объекта с конечным временем восстановления.

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

$$K_r = \frac{\mu}{\omega + \mu} = \frac{1}{T_{\text{вср}} \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_{\text{вср}}} \right)} = \frac{T_0 \cdot T_{\text{вср}}}{T_{\text{вср}} (T_{\text{вср}} + T_0)} = \frac{T_0}{T_0 + T_{\text{вср}}}, \quad (2.39)$$

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

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

$$K_r = \frac{T_{\text{рсп}}}{T_{\text{рсп}} + T'_{\text{вср}}}, \quad (2.40)$$

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

Соответственно, повышение K_r достигается либо увеличением среднего времени безотказной работы, либо уменьшением среднего времени восстановления.

Коэффициент оперативной готовности $K_{\text{оз}}$ предусматривает необходимость внезапного использования выполнения объектом основных функций в течение времени t_p .

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

$$K_{oz} = K_r \cdot P(t_p) = \frac{1}{1 + \frac{\omega}{\mu}} \cdot e^{-\mu t_p}. \quad (2.41)$$

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ статистически определяется отношением суммарного времени пребывания наблюдаемых объектов в работоспособном состоянии к числу наблюдаемых объектов за заданное время эксплуатации:

$$K_{ти} = \frac{T_{сум\ раб}}{T_{раб} + T_{рем} + T_{обсл}}. \quad (2.42)$$

Коэффициент простоя K_n – вероятность неработоспособного состояния восстанавливаемого объекта с конечным временем восстановления:

$$K_n = \frac{\omega}{\omega + \mu} = \frac{T_{всп}}{T_{всп} + T_0}. \quad (2.43)$$

При анализе надежности необходимо выявлять преобладающие причины отказов и лишь затем, если в этом есть необходимость, учитывать влияние остальных причин.

3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТА

3.1 Теория надежности и законы распределения случайных величин

При исследовании надежности объектов приходится иметь дело с различными случайными величинами. Для практической работы необходимы статистические модели, позволяющие их описывать [20].

В теории надежности идут двумя путями:

1. В результате испытаний или наблюдений получают информацию об отказах или сохранении работоспособности объекта. По результатам, методами математической статистики находят статистическую модель, описывающую явления.

2. Задается (находится, принимается) статистическая модель для конкретной ситуации, а по ней определяются характеристики надежности будущих объектов.

Понятно, что второй путь основан на существовании первого.

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

На рисунке 3.1. параметр θ , в зависимости от целей испытания, может быть, например, параметром точности работы, шумовой или вибрационной характеристикой, ресурсом и т.д. Соответственно θ_{\max} – это предельное значение рассматриваемого параметра.

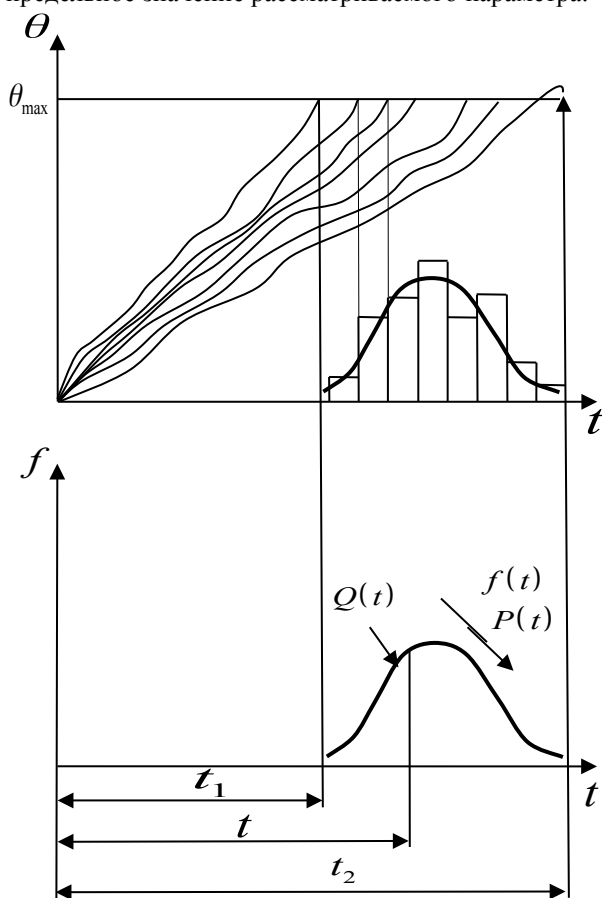


Рис. 3.1 – Построение графика плотности распределения параметра θ :

где t_1 – время, когда появляются первые признаки предельного состояния объекта; t_2 – время, когда исчерпываются потенциальные возможности дальнейшей эксплуатации

Рассмотрим основные распределения, наиболее часто встречающиеся при исследовании надежности механического оборудования в разные периоды эксплуатации.

3.2 Надежность в период нормальной эксплуатации

В этот период постепенные отказы еще не проявляются и надежность объекта характеризуется *внезапными отказами*. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность, которая не зависит от возраста объекта $\lambda(t) = \lambda = const$ [20, 22].

Описывает надежность изделий в этот период экспоненциальное распределение:

$$\lambda = \frac{1}{T_{cp}}; \tag{3.1}$$

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$$

где T_{cp} – среднее значение (математическое ожидание)

наработки до отказа; t_i – наработка до отказа i -го изделия.

Интенсивность отказов, а также остальные параметры: функция распределения, плотность распределения, вероятность безотказной работы приведены в виде зависимостей (3.2) и в виде графиков на рисунке 3.2.

$$\begin{aligned}
 F(t) = Q(t) &= 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\frac{t}{T_{cp}}}; \\
 P(t) &= 1 - Q(t) = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}; \\
 f(t) &= \lambda \cdot e^{-\lambda t} = \frac{1}{T_{cp}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{cp}}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Для практических расчетов вероятности безотказной работы используют таблицы, которые, кстати, позволяют наглядно оценить значения (табл. 3.1).

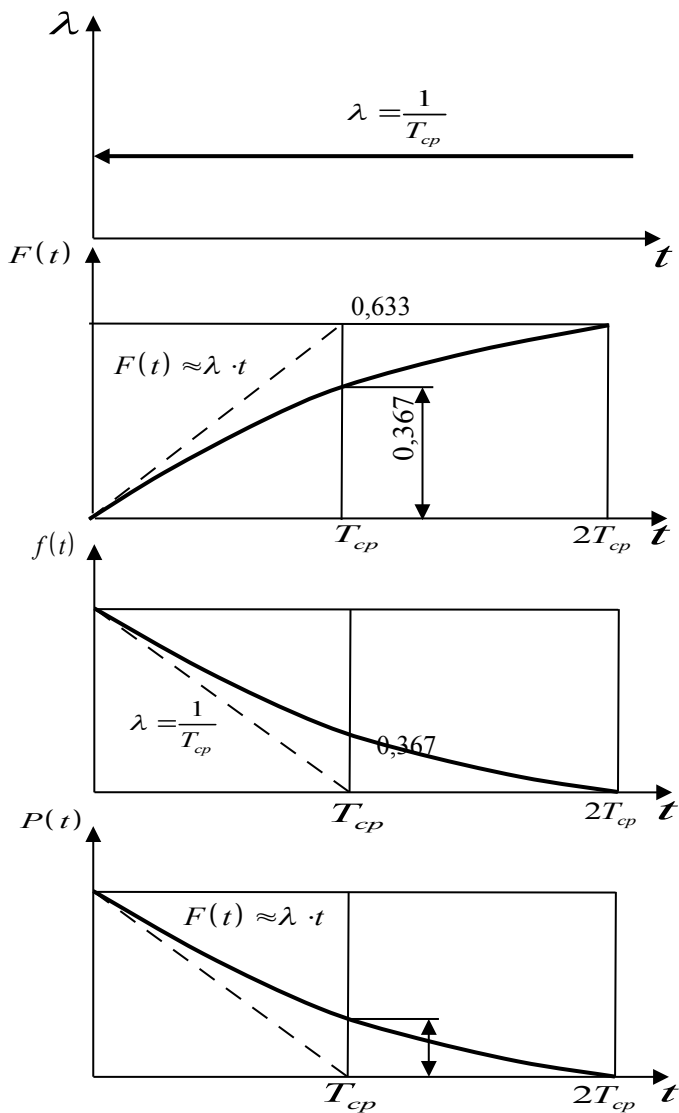


Рис. 3.2 – Интенсивность отказов, функция распределения, плотность распределения и вероятность безотказной работы при экспоненциальном распределении

Таблица 3.1 – Расчет вероятности безотказной работы изделий

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

Так, при $\frac{t}{T_{cp}} = 1$ вероятность $P(t) \approx 0,37$, т.е. 63 % отказов возникает за время $t < T_{cp}$ и только 37% позднее. Из приведенных значений следует, что для обеспечения высокой вероятности безотказной работы, например, 0,9 или 0,99 можно использовать только малую долю среднего срока службы 0,1 и 0,01, соответственно.

Линеаризация экспоненциальной функции позволяет существенно упростить расчеты показателей безотказности, для которых $P(t) > 0,9$,

а произведение $\lambda \cdot t = \left(\frac{t}{T_{cp}} \right) < 0,1$

В этом случае экспоненциальная функция раскладывается в ряд Маклорена:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = P(0) - \frac{P'(0)}{1!} \cdot t + \frac{P''(0)}{2!} \cdot t^2 - \dots + \frac{P^{(n)}(0)}{n!} \cdot t^n - \frac{P^{(n+1)}(0)}{(n+1)!} \cdot t^{n+1}$$

Или:

$$P(t) = 1 - \lambda \cdot t + \frac{\lambda^2}{2!} t^2 - \frac{\lambda^3}{3!} t^3 + \dots \quad (3.3)$$

При указанных выше условиях:

$$P(t) \approx 1 - \lambda \cdot t$$

$$Q(t) \approx \lambda \cdot t$$

Представление о величине λ различных механических элементов представлено в таблице 3.2 [23].

Если работа объекта происходит при разных режимах, а следовательно, и интенсивностей отказов $\lambda_1 (0 < t < t_1)$ и $\lambda_2 (t_1 < t < t_2)$, тогда вероятность безотказной работы определяется выражением:

$$P(t) = e^{-\lambda t_1 - \lambda_2(t_2 - t_1)} \quad (3.4)$$

Эта зависимость следует из теоремы умножения вероятностей.

Таблица 3.2 – Величина интенсивности отказов некоторых механических элементов

Элемент	Интенсивность отказа $\lambda \cdot 10^6$ 1/ч	
	Средняя	Пределы изменения
Редуктор зубчатый:		
– одноступенчатый	0,12	0,01...0,2
– многоступенчатый	1,2	0,82...6
Подшипники качения:		
– шариковые	0,65	0,02...2,22
– роликовые	0,5	0,02...1,0
Подшипники скольжения	0,21	0,008...0,42
Оси	0,35	0,15...0,62
Муфты:		
– упругие	0,4	0,03...1,35
– электромагнитные	0,6	0,24...0,93
Приводы	5,1	0,35...13,7

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

3.3 Надежность в период постепенных отказов

Для постепенных отказов нужны законы распределения времени безотказной работы, которые дают вначале низкую плотность распределения, затем максимум и далее падение, связанное с уменьшением числа работоспособных элементов.

Типовой пример формирования такого распределения показан на графике изменения выходного параметра плотности распределения параметра θ рисунка 3.1. Рассмотрим некоторые из них.

3.3.1 Нормальное распределение

Нормальное распределение имеет место, когда отклонение случайной величины создают многие примерно равнозначные по воздействию, независимые (или слабо зависимые) друг от друга факторы.

Так как на практике часто выполняются именно эти условия, то нормальное распределение является самым распространенным.

Нормальному распределению подчиняются: наработка на отказ многих восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий; размеры и ошибки измерения деталей; механические характеристики материалов (пределы текучести, прочности, выносливости) [30, 36].

Плотность распределения при нормальном распределении описывается формулой:

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

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

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

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

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

Теоретически функция плотности распределения, подчиняющаяся нормальному закону распределения распространяется в диапазоне от $x = -\infty$ до $x = +\infty$, но это не является существенным недостатком, так как площадь, очерченная уходящими в бесконечность ветвями,

начиная с диапазонов $x < M(x) - 3\sigma_x$ и $x > M(x) + 3\sigma_x$ составляет величину 0,27%.

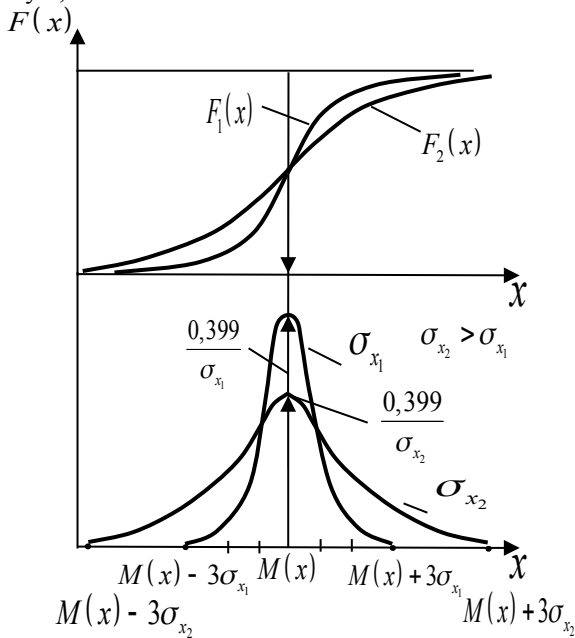


Рис. 3.3 – Функция и плотность нормального закона распределения

Т.е. вероятность отказа за период $x < M(x) - 3\sigma_x$ составляет всего 0,135% и обычно не учитывается в расчетах. Наибольшая ордината кривой равна $0,399/\sigma_x$.

Функция нормального распределения определяется интегрированием функции плотности распределения

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

Интеграл такого вида не выражается через элементарные функции.

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

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

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

Пропуская вывод уравнения, запишем выражение для определения функции нормального распределения:

$$F(x) = 0,5 + \Phi(u), \quad (3.8)$$

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

где — интеграл Лапласа.

Вкладывая смысл функции нормального распределения как вероятность отказа в заданном интервале времени $F(x) = Q(t)$, вероятность безотказной работы будет:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 0,5 - \Phi(u) = \varphi(u), \quad (3.9)$$

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

Таблица 3.3 – Связь $P(t)$ с квантилью u

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

Пример.

Оценить вероятность $P(t)$ безотказной работы в течение $t = 1,5 \cdot 10^4$ ч изнашиваемого подвижного сопряжения, если ресурс по

износу подчиняется нормальному распределению с параметрами $M(t) = 4 \cdot 10^4$ ч, $\sigma = 10^4$ ч.

Решение.

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

, по таблице 3.3 определяем $P(t) = 0,9938$.

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

Пример.

Оценить 90% - ный ресурс гусеницы трактора, если известно, что долговечность гусеницы ограничена по износу, ресурс подчиняется нормальному распределению с параметрами $M(t) = 10^4$ ч, $\sigma = 10^3$ ч.

Решение.

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

$$u \text{ (при } P(t) = 0,9) = -1,282,$$

$$t = 6 \cdot 10^3 \cdot (-1,282) + 10^4 = 2,3 \cdot 10^3 \text{ ч.}$$

3.3.2 Логарифмически нормальное распределение

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

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_{\ln t} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma_{\ln t}^2}}, \quad (3.10)$$

где μ – математическое ожидание логарифма времени;

$\sigma_{\ln t}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма времени.

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

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln t_i; \quad \bar{\sigma}_{\ln t} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln t_i - \bar{\mu})^2}. \quad (3.11)$$

Вероятность безотказной работы можно определить по таблице 3.3 для нормального распределения в зависимости от квантили, которая будет определяться следующим образом:

$$u = (\ln t - \mu) / \sigma_{\ln t} \rightarrow P(t)_{\text{табл.}} \quad (3.12)$$

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

Данное распределение хорошо моделирует отказы, происходящие вследствие накопления элементарных повреждений в материале деталей. В этой связи оно принято в качестве одной из статистических моделей усталостных отказов, которые происходят в результате постепенного суммирования внутренних дефектов металла, превращая их в микротрещины, и последующего роста их до размеров, приводящих к недопустимому ослаблению сечения детали [37].

3.3.3 Распределение Вейбулла

Распределение Вейбулла соответствует более общей статистической модели, чем предыдущие виды распределений, охватывает различные законы изменения случайной величины с течением времени [35-37].

Плотность распределения Вейбулла описывается зависимостью:

$$f(t) = \frac{\sigma}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{\sigma-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^\sigma}. \quad (3.13)$$

Как видно из формулы (3.13) это распределение двухпараметрическое, параметр a – называют параметром масштаба; σ – параметром формы.

Функция распределения (вероятность отказов) имеет вид:

$$F(t, a, \sigma) = Q(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^\sigma}. \quad (3.14)$$

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^\sigma}. \quad (3.15)$$

Интенсивность отказов определяется по формуле:

$$\lambda(t) = - \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} = \frac{\varrho}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{\varrho-1}. \quad (3.16)$$

Средняя наработка на отказ:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = a \cdot \Gamma, \quad (3.17)$$

где Γ – табулированная гамма-функция.

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение рассчитываются по формулам (3.18):

$$\begin{aligned} M(t) &= m \cdot a, \\ \sigma_t &= c \cdot a, \end{aligned} \quad (3.18)$$

где m и c – коэффициенты, выбираемые по таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Коэффициенты распределения Вейбулла

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

Возможности и универсальность распределения Вейбулла видны из следующих пояснений:

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

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

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

Иллюстрация сказанного приведена на рисунках 3.4...3.6.

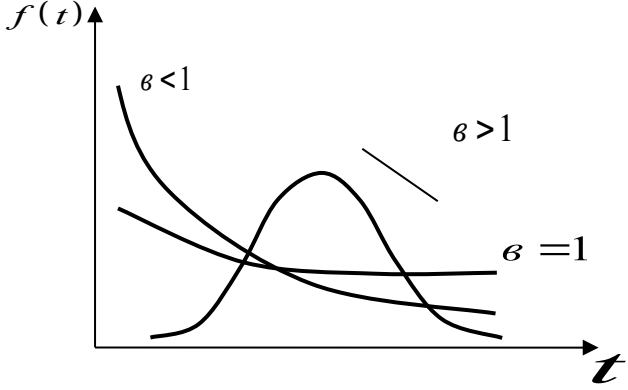


Рис. 3.4 – Плотность распределения Вейбулла в функции от времени

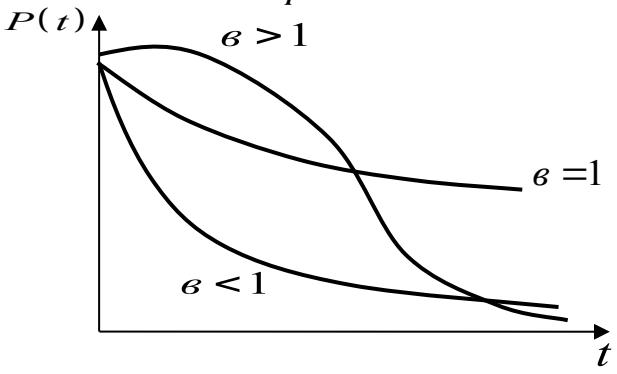


Рис. 3.5 – Вероятность безотказной работы (распределение Вейбулла)

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.

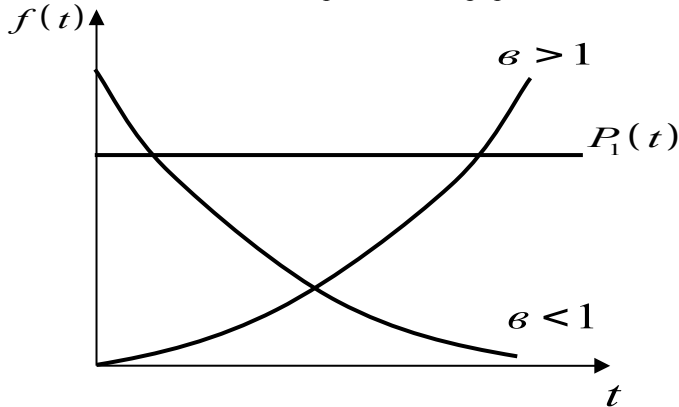


Рис. 3.6 – Плотность распределения Вейбулла и вероятность безотказной работы при $v < 1$ и $v > 1$

Распределение Вейбулла является универсальным, так как при соответствующих значениях параметров превращается в нормальное, экспоненциальное и другие виды распределений.

3.4 Совместное действие внезапных и постепенных отказов

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

$$P(t) = P_e(t) \cdot P_n(t) = e^{-\lambda t} \cdot \frac{P(T+t)}{P(t)}. \quad (3.19)$$

Графически эта зависимость представлена на рисунке 3.7.

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 [20, 22].

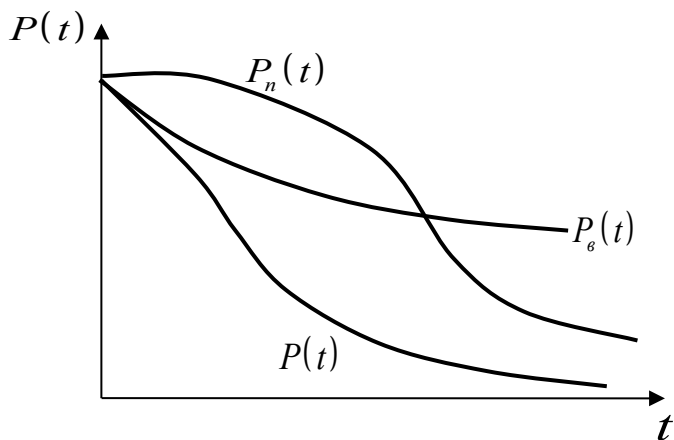


Рис. 3.7 – Совместное действие внезапных и постепенных отказов

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

3.5 Применимость законов распределения

Рассмотрим применимость тех или иных законов на примере законов распределения ресурса деталей подъемно-транспортных машин, таблица 3.5.

Таблица 3.5 – Применимость законов распределения

Детали	Законы распределения			
	Экспоненциальный	Нормальный	Логарифмический	Вейбулла
Канаты	+	+	-	-
Зубчатые колеса	-	-	-	+
Металлоконструкции	+	-	-	+
Ходовые колеса	-	-	-	+
Катки поворота	-	-	-	+
Канатные блоки	-	-	-	+
Валы редукторов	-	+	-	-

Различие в законах распределения по одним и тем же элементам объясняется особенностями условий эксплуатации. Так, нормальный закон распределения ресурса грузовых канатов объясняется однородностью и стабильностью технологии изготовления – постоянность интенсивности износа. Одновременно, отказы канатов связаны с перетиранием их при заклинивании блоков, соскакивании канатов, в этом случае ресурс распределяется по экспоненциальному закону.

4. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ

Надежность в общем случае – комплексное свойство, включающее такие понятия, как *безотказность*, *долговечность*, *ремонтпригодность*, *сохраняемость*. Для конкретных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость [1, 7, 10, 20].

4.1 Структурная схема безотказности изделия

Рассмотренные ранее соотношения безотказности были выведены в предположении того, что изучаемое изделие либо весьма несложно, либо, будучи достаточно сложным, рассматривается как одно целое.

Применительно к реальным машинам такой подход, когда при исследованиях фиксируется лишь общее число отказов изделия в целом, не всегда удобен, поскольку в результате затруднительно выделить наиболее слабые элементы и оценить их безотказность.

Кроме того, при конструировании новых машин широко используются многие детали и узлы, заимствованные из старых конструкций. При этом поэлементное знание характеристик безотказности старой конструкции, безусловно, удобнее знания всей машины.

И, наконец, не всякую машину или изделие можно поставить на испытание целиком, тем более в достаточном количестве экземпляров. Значительно проще оказываются поэлементные испытания.

Если имеются данные о безотказности элементов конструкции, пользуясь методами теории вероятности, можно рассчитать безотказность всей конструкции. Расчет, таким образом, может заменить дорогостоящие испытания [10, 20].

Для этой цели от принципиальной или функциональной схемы переходят к структурной, позволяющей построить математическую модель, которая учитывала бы влияние функционального назначения и связей между элементами на надежность всей системы.

При этом источником точных данных о безотказности простых элементов все-таки служит практика, эксперимент.

Для составления структурной схемы изделия его разбивают на элементы, а затем решают, как влияет отказ элемента на отказ изделия. Граничными являются два случая:

- отказ элемента вызывает отказ всего изделия, и тогда элемент считается включенным последовательно;
- отказ изделия получается только при одновременном отказе нескольких элементов, и тогда они считаются включенными параллельно.

При составлении структурных схем придерживаются следующих правил:

1. Элементы изображаются в виде прямоугольников и обозначаются номерами или индексами.
2. Одна сторона прямоугольника считается входом, другая – выходом элемента.
3. Элемент считается работающим безотказно, если условный сигнал со входа элемента проходит на выход.
4. Отказ элемента означает невозможность передачи через него условного сигнала.
5. Линии, соединяющие элементы друг с другом, характеризуются абсолютной безотказностью.
6. Путь передачи условного сигнала состоит из последовательного соединения линий и элементов.

При составлении структурной схемы машины анализируются безотказная работа всех ее систем. Если система не влияет на безотказность машины, то она не включается в схему.

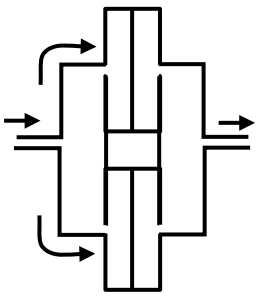
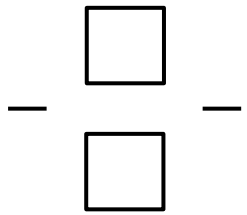

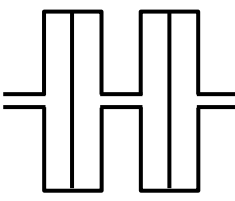
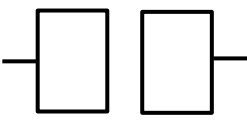
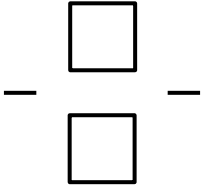
Разбивка машины по системам производится тремя методами:

- по принципу действия: гидравлическая, механическая, электрическая, пневматическая и т.д.;
- по характеру выполняемых работ: механизм передвижения, механизм подъема, механизм поворота и т.д.;
- по операциям, выполняемым машиной в течение рабочего цикла.

Отметим, что структурная схема безотказности не повторяет функциональную [1, 14, 20, 27].

Разница между конструктивной и структурной схемами показана на рисунках таблицы 4.1 на примере двух фильтров гидросистемы, которые для повышения надежности работы системы могут быть установлены последовательно или параллельно. Формирование структурных схем на примере гидросистемы представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Формирование структурных схем на примере гидросистемы

Конструктивная схема	Структурная схема	
	Засорение сетки	Разрыв сетки
		
		

При параллельной установке фильтров засорение одного из них не приводит к выходу из строя всей системы, поэтому в структурной схеме они стоят параллельно, а в случае разрыва сетки любого из фильтров система очистки работать перестанет, вследствие чего в структурной схеме они последовательны.

Аналогичные рассуждения для фильтров, установленных последовательно позволяют понять принципы построения структурных схем, которые также представлены в таблице 4.1 последовательной и параллельной схемами. Рассмотрим другой пример (рис. 4.1). Сила F передается через три одинаковых стержня.

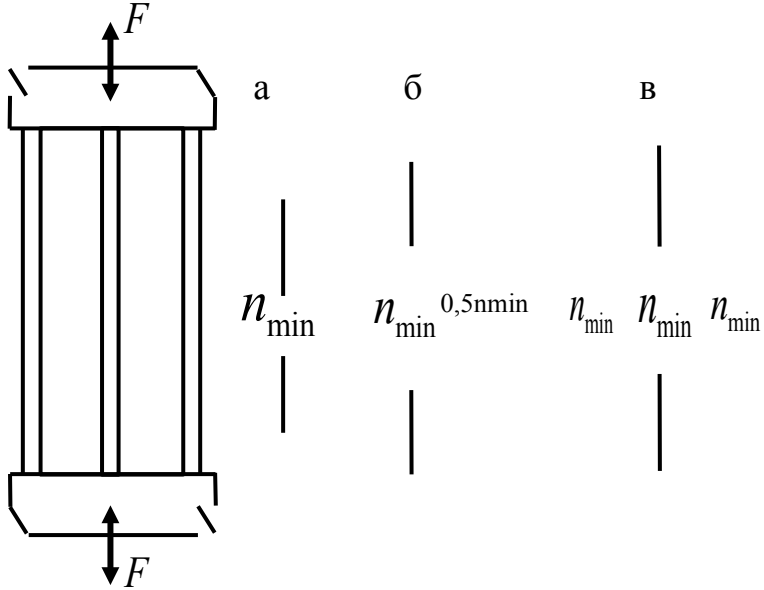


Рис. 4.1 – Формирование структурной схемы на примере стержневой системы

Структурная схема безотказности системы (рис. 4.1) зависит от прочности стержней:

а) стержни вместе обеспечивают минимальный запас прочности n_{\min} , если разрушить один из них вся система откажет. Поэтому в данном случае можно считать, что вместо трех стержней имеется один элемент с площадью сечения $S_1 = 3S$ и запасом прочности n_{\min} , Рис. 4.1а;

б) увеличим сечения стержней в 1,5 раза. Тогда любые два стержня имеют сечение $S_2 = 3S$, обеспечивая n_{\min} , а структурная схема будет иметь вид параллельного соединения (рис. 4.1 б);

в) пусть площадь каждого стержня будет $S_3 = 3S$. Тогда разрушения любых двух стержней не вызовет отказа изделия и все стержни можно считать включенными параллельно (Рис. 4.1в).

Т.е. одному и тому же изделию могут соответствовать разные структурные схемы.

Структурный анализ позволяет принять предварительное решение по каждой детали или узлу, ограничивающими безотказность или долговечность изделия, повысить ресурс одних деталей, включить другие детали в число запасных частей, ввести ряд операций технического обслуживания для поддержания или восстановления ресурса отдельных деталей, узлов, систем.

4.2 Расчет надежности последовательных систем

Структурная схема последовательного соединения представлена на рисунке 4.2. Наиболее наглядным примером последовательных систем могут служить автоматические станочные линии без резервных цепей и накопителей. В них название реализуется буквально. Однако понятие «последовательная система» в задачах надежности более широкое, чем обычно. К этим системам относят все системы, в которых отказ элементов приводит к отказу всей системы.

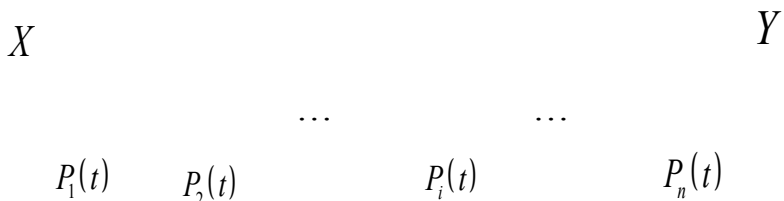


Рис. 4.2 – Последовательная система

Наиболее наглядным примером последовательных систем могут служить автоматические станочные линии без резервных цепей и накопителей. В них название реализуется буквально. Однако понятие «последовательная система» в задачах надежности более широкое, чем обычно. К этим системам относят все системы, в которых отказ элементов приводит к отказу всей системы.

Например, систему подшипников механических передач рассматривают как последовательную, хотя подшипники каждого вала работают параллельно.

Считаем, что вероятность отказа любого элемента в системе не зависит от вероятности отказа других элементов, т.е. элементам системы присущи независимые отказы.

Тогда, в соответствии с теоремой умножения вероятностей, согласно которой вероятность совместного проявления независимых событий равна произведению вероятностей этих событий, вероятность безотказной работы всей системы будет равна:

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

где $P_c(t)$ – вероятность безотказной работы системы в течение времени t ; n – число последовательно соединенных элементов; $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента.

Так как общая формула безотказной работы при внезапных отказах имеет вид:

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

Тогда:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \lambda_c(t) dt}, \quad (4.2)$$

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t).$$

где $\lambda_c(t)$ – интенсивность отказов систем.

Т.е. интенсивность отказов систем $\lambda_c(t)$ в момент времени t равна сумме интенсивности отказов составляющих ее элементов.

Если все элементы подчиняются экспоненциальному закону надежности, т.е.:

$$\lambda_i(t) = \lambda = const,$$

то и вся структура также подчиняется экспоненциальному закону надежности, причем $\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_n$, т.е.:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t}. \quad (4.3)$$

Вероятность безотказной работы систем из n одинаковых элементов равна:

$$P_c(t) = P_i(t)^n. \quad (4.4)$$

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

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

Следовательно, общая надежность системы при последовательном соединении элементов всегда ниже надежности самого слабого элемента.

Повысить надежность такой системы можно за счет:

- повышения надежности составляющих элементов;
- сокращения количества элементов.

Если же подобные меры не приводят к повышению безотказности до желаемого уровня, следует прибегать к другому методу соединений элементов – параллельному (резервированию). Избыточные (резервные) элементы целесообразно подключать в первую очередь к наиболее слабым элементам [1, 7, 20].

4.3 Расчет надежности параллельных систем

Система, состоящая из параллельно соединенных элементов, приведена на рисунке 4.3.

1

2

i

m

Рис. 4.3 – Параллельная система

Исходя из определения, что отказ системы с параллельно соединенными, в структурной схеме, элементами наступает при отказе одновременно всех элементов, вероятность отказа всей системы в течение времени t определится как произведение вероятностей отказов всех ее элементов в течение того же времени:

$$Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \dots Q_i(t) \dots Q_m(t) = \prod_{i=1}^m Q_i(t), \quad (4.5)$$

где m – число параллельно соединенных элементов;
 $Q_i(t)$ – вероятность отказа i -го элемента системы.

Вероятность безотказной работы системы равна:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^m Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i(t)). \quad (4.6)$$

Например, если $P_i(t) = 0,9$, а $m = 3$, то $P_c(t) = 1 - (1 - 0,9)^3 = 0,999$.

Таким образом, вероятность безотказной работы системы резко повышается и становится возможным создание высоконадежных систем из ненадежных элементов.

В системе с параллельным соединением элементов представляет интерес знание вероятности безотказной работы всех элементов системы, т.е. системы без одного, без двух и т.д. элементов в пределах

сохранения системой работоспособности хотя бы с сильно пониженными показателями. Например, четырехмоторный самолет может продолжить полет после отказа двух двигателей.

Сохранение работоспособности системы из одинаковых элементов определяется с помощью биномиального распределения.

Рассматриваем бином вида:

$$[P(t) + Q(t)]^m = 1, \quad (4.7)$$

где показатель степени m - равняется общему числу параллельно работающих элементов; $P(t)$ и $Q(t)$ - вероятности безотказной работы и отказа каждого из элементов, соответственно.

Запишем результаты разложения биномов с показателями степени 2, 3 и 4 соответственно для систем с двумя, тремя и четырьмя параллельно работающими элементами:

$$(P + Q)^2 = P^2 + 2 \cdot PQ + Q^2 = 1;$$

$$(P + Q)^3 = P^3 + 3 \cdot P^2Q + 3 \cdot PQ^2 + Q^3 = 1;$$

$$(P + Q)^4 = P^4 + 4 \cdot P^3Q + 6 \cdot P^2Q^2 + 4 \cdot PQ^3 + Q^4 = 1.$$

В них первые члены выражают вероятность безотказной работы всех элементов, вторые - вероятность отказа одного элемента и безотказной работы остальных, первые два члена - вероятность отказа не более одного элемента и т.д. Последний член выражает вероятность отказа всех элементов.

4.4 Безотказность объекта при смешанном соединении элементов

Показатели безотказности объекта при смешанном соединении элементов рассчитываются по выше приведенным формулам для последовательного и параллельного соединения элементов [36]. Рассмотрим такое соединение, приведенное на рисунке 4.4.

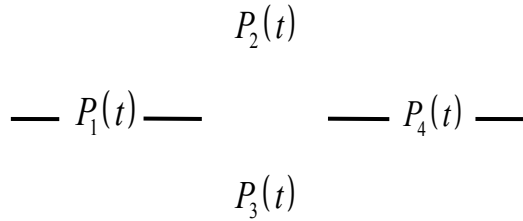


Рис. 4.4 – Смешанное соединение элементов

Сначала определяют вероятность безотказной работы для каждой группы параллельно соединенных элементов, в данном случае это элементы 2 и 3

$$P_{23}(t) = 1 - (1 - P_2(t))(1 - P_3(t)).$$

Это позволяет привести систему со смешанным соединением элементов к системе с последовательным соединением (Рис. 4.5).

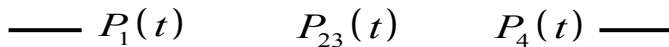


Рис. 4.5 – Перевод смешанного соединения в последовательное соединение элементов

Далее расчет известен:

$$P_c = P_1(t) \cdot P_{23}(t) \cdot P_4(t).$$

Вероятность безотказной работы в течение определенного времени $P(t)$ относится к числу наиболее широко применяемых критериев надежности технических систем.

4.5 Расчет надежности сложных систем

В структурных схемах надежности иногда встречаются связи, которые нельзя отнести ни к последовательному, ни к параллельному соединению, как представлено на рисунке 4.6, из-за наличия связи через элемент B .

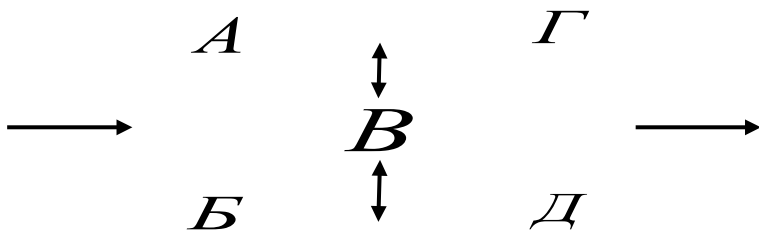


Рис. 4.6 – Смешанное соединение элементов (пример)

Если работа схемы состоит в передаче условного сигнала слева направо, то для успешного решения задачи необходимо сохранить работоспособность следующих комбинаций элементов.

- 1 → АГ
- 2 → БД
- 3 → АВД
- 4 → БВГ

Для расчета вероятностей безотказной работы подобных схем пользуются формулой полной вероятности. Суть ее в следующем.

Вероятность события, например C , которое может произойти вместе с одной из гипотез H_1, H_2, \dots, H_n , образующих полную

группу несовместных событий $\sum_{i=1}^n P(H_i) = 1$, равна сумме парных произведений вероятностей каждой из этих гипотез на отвечающие им условные вероятности наступления событий C :

$$P(C) = \sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(C/H_i). \quad (4.8)$$

Формулу полной вероятности к расчету безотказности систем рекомендуется применять в следующей последовательности:

1. Выбрать элемент, относительно которого будут выдвигаться гипотезы о его работоспособности. В теории надежности вводятся две несовместные гипотезы:

- H_1 – элемент работоспособен;
- H_2 – элемент отказал.

2. С учетом выбранного элемента изучить условные вероятности безотказной работы системы при выдвинутых гипотезах.

Для наглядности полезно изображать структурные схемы системы при реализации каждой из гипотез.

3. Определить полную вероятность безотказной работы системы.

Например, пусть гипотезы выдвигаются относительно элемента B

Рассмотрим случай: а) – элемент B работоспособен (Рис. 4.7).

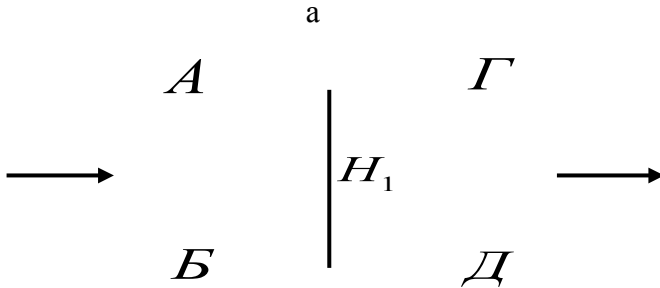


Рис. 4.7 – Анализ гипотезы, когда элемент B работоспособен

Тогда вероятность гипотезы H_1 определяется вероятностью работоспособности элемента, то есть:

$$P(H_1) = P_B(t). \quad (4.9)$$

В данной структурной схеме системы элементы A и B , а также $Г$ и $Д$ – параллельны, и, далее элементы AB и $ГД$ – последовательны. Опуская знаки (t) запишем:

$$P(C/H_1) = P_{AB} \cdot P_{ГД} = (1 - (1 - P_A) \cdot (1 - P_B)) (1 - (1 - P_Г) (1 - P_Д)).$$

Рассмотрим случай: б) – элемент B неработоспособен (Рис. 4.8).

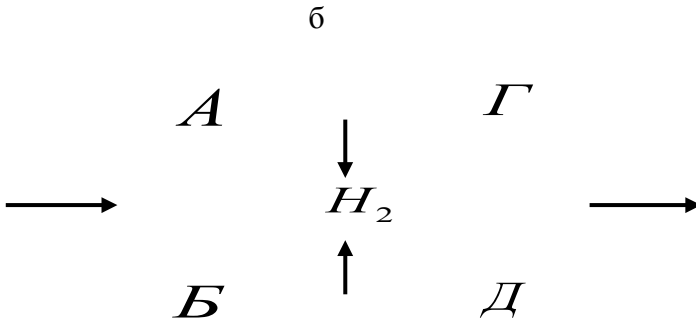


Рис. 4.8 – Анализ гипотезы, когда элемент B не работоспособен

Вероятность гипотезы H_2 определяется вероятностью отказа элемента B :

$$P(H_2) = Q_B(t) = 1 - P_B(t).$$

В структурной схеме системы элементы A и G , а также B и D соединены последовательно, и, вместе параллельно. Тогда вероятность будет равна:

$$P(C/H_2) = 1 - (1 - P_A \cdot P_G) \cdot (1 - P_B \cdot P_D).$$

Полная, безусловная, вероятность безотказной работы системы определяется зависимостью:

$$\begin{aligned} P(C) &= P(H_1) \cdot P(C/H_1) + P(H_2) \cdot P(C/H_2) = \\ &= P_B \cdot \left[(1 - (1 - P_A) \cdot (1 - P_G)) \cdot (1 - (1 - P_D)) \right] + (1 - P_B(t)) \cdot \left[1 - (1 - P_A \cdot P_G) \cdot (1 - P_B \cdot P_D) \right]. \end{aligned}$$

Пример. Пусть вероятность безотказной работы всех элементов схемы, представленной на рисунке 4.7, будет $P_i = 0,5$, тогда вероятность безотказной работы системы равна:

$$P(C) = 0,5 \left[0,5625 \right] + 0,5 \left[0,4375 \right] = 0,5.$$

Для сравнения без элемента B : $P(C) = 0,4375$, а надежность одной ветви $P(C) = 0,25$.

Гипотезу работоспособности можно выдвигать применительно к любому элементу системы. Это приводит к аналогичному результату.

Отметим также, что формула полной вероятности события универсальна. Пользуясь ею, можно получить формулу для надежности при любом соединении элементов.

4.6 Резерв и резервирование

Важным методом повышения надежности изделия является **резервирование**, т.е. введение избыточности [33, 35].

Резерв – совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования.

Резервирование – применение дополнительных средств и (или) возможностей для сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов.

Выделяют следующие виды резервирования:

- нагрузочное;
- энергетическое;
- параметрическое;
- функциональное;
- структурное.

4.6.1 Нагрузочное резервирование

Нагрузочное резервирование заключается в *повышении способности объекта к восприятию нагрузок*. Пути такого повышения:

- намеренное увеличение запаса прочности использованием материалов более высокого качества и большей площади сечения деталей;
- выбор режимов работы объекта менее напряженных, чем номинальный.

Нагрузочное резервирование обычно оценивается коэффициентом запаса прочности, который назначается повышенным для наиболее ответственных элементов.

Для ряда отраслей коэффициенты запаса прочности нормированы. Например, коэффициент запаса для канатов грузоподъемных машин, в зависимости от режима работы и ответственности составляет от 4 до 15 (пассажирские лифты), коэффициент запаса тормозного момента механизма подъема 1,5...2,5 т.д.

4.6.2 Энергетическое резервирование

Энергетическое резервирование – это запас мощности, который может быть использован в более тяжелых условиях эксплуатации или при старении объекта.

Наиболее характерный пример – установка более мощного двигателя, чем это необходимо в нормальных условиях его работы.

4.6.3 Параметрическое резервирование

Параметрическое резервирование – это увеличение функционального параметра объекта с целью повышения надежности в зависимости от режима работы. Например, увеличение коэффициента запаса тормозного момента подъемно-транспортной машины в зависимости от тяжести работы.

4.6.4 Функциональное резервирование

Функциональное резервирование – наличие в объекте функциональных возможностей сверх минимально необходимых для его функционирования.

Например, в автомобиле ручной тормоз по основному назначению является стояночным, но, кроме того, может использоваться и при движении.

4.6.5 Структурное резервирование

Структурное резервирование заключается в применении дополнительных элементов, не являющихся функционально необходимыми, и используемых только для замены отказавших основных.

При таком резервировании отказ объекта наступает только после отказа основного и всех резервных элементов.

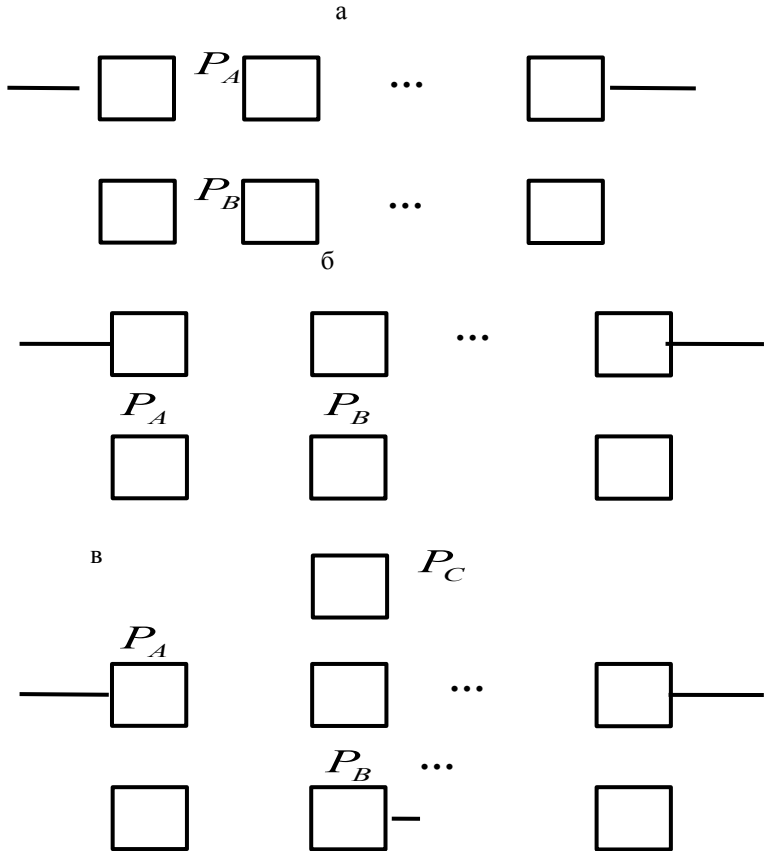
Структурное резервирование можно охарактеризовать параметрами, изображенными на рис. 4.9.

В общем случае структурное резервирование имеет несколько параметров. Рассмотрим некоторые из них.

Система резервирования при постоянном включении однократного нагруженного резерва приведена на рисунке 4.10.

	Резервирование объекта в целом
	Общее
Уровень резервирования	Раздельное резервирование отдельных элементов
	Смешанное
	и то и др.
	Функционирование наравне с основными
Способ включения резерва	Постоянное
	Замещения
	Включение при отказе основного
	Нагруженный
Состояние резерва	Облегченный
	Ненагруженный
	Однократное
Кратность резервирования	Многократное

Рис. 4.9 – Параметры структурного резервирования



**Рис. 4.10 – Резервирование при постоянном включении
однократного нагруженного резерва: а) с общим резервированием;
б) с отдельным резервированием; в) со смешанным
резервированием**

Расчеты надежности ведутся как для смешанного соединения элементов. Для многократного резерва параллельно вводится понятие – кратность резерва:

$$k = \frac{m - z}{z}, \quad (4.10)$$

где: m – всего элементов в схеме; z – число основных элементов.

Например, на схеме рисунка 4.10 а) в основной ветви будем считать $m = 3$ элемента, и всего $z = 6$, следовательно, кратность $k = 1$ (однократное резервирование).

При ненагруженном резервировании резервные элементы включаются только при отказе основных. Передача функций резервному элементу может производиться вручную или автоматически.

Вероятность отказа всех элементов системы при таком резервировании выражается формулой:

$$Q_c(t) = \frac{Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot Q_3(t) \dots \cdot Q_n(t)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots \cdot n} = \frac{\prod_{i=1}^n Q_i(t)}{n!}. \quad (4.11)$$

Т.е. вероятность отказа при резервировании замещением в $n!$ раз меньше, чем при постоянном резервировании. Это справедливо при условии надежной передачи функций резервному элементу, в противном случае выигрыш может быть легко утерян.

Наработка до отказа системы с ненагруженным резервированием в общем случае равна сумме наработок до отказа элементов:

$$T_c = T_0 + \sum_{i=1}^m T_i, \quad (4.12)$$

где: T_0 – наработка до отказа основного элемента; T_i – наработка до отказа i -го ненагруженного резервного элемента; m – число резервных элементов.

Во многих случаях невыгодно применять нагруженный резерв, т.к. из-за отказов резервных элементов он не дает желаемого выигрыша в надежности. Вместе с тем иногда отсутствуют возможности использования ненагруженного резерва, ибо от момента включения элемента до момента, когда он становится работоспособным, проходит некоторое время – элемент «разогревается», а условия эксплуатации не допускают перерыва в работе системы. В подобных случаях и применяют облегченный резерв.

В общем случае формулы для расчета вероятности отказа или безотказной работы системы с облегченным резервом весьма сложны. Ограничимся случаем, когда надежность элементов в рабочем состоянии подчиняются экспоненциальному закону, и надежность элемента в рабочем состоянии не зависит от времени пребывания в

нерабочем состоянии. Вероятность безотказной работы в этом случае будет рассчитываться по формуле:

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_1) \dots (\lambda + (n-1)\lambda_1)}{n!} \cdot t, \quad (4.13)$$

где: λ – интенсивность отказов работающих элементов;
 λ_1 – интенсивность отказов элементов, работающих в облегченном режиме.

При простом дублировании формула (4.13) принимает вид:

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_1)}{2} \cdot t,$$

при двух резервных элементах:

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_1) \cdot (\lambda + 2 \cdot \lambda_1)}{6} \cdot t.$$

Выбор наилучшего варианта резервирования зависит главным образом от того увеличения надежности, которое можно достичь при заданных расходах.

4.7 Эффективность резервирования

Эффективность резервирования оценивается коэффициентом повышения надежности K_p , который представляет собой отношение вероятностей исправной работы резервированной и нерезервированной системы P_i :

$$K_p = \frac{P_p}{P_i}. \quad (4.14)$$

Для случая, когда все элементы системы одинаковы, коэффициент повышения надежности определяется по формуле:

$$K_p = \frac{1 - (1 - P_i)^m}{P_i}. \quad (4.15)$$

Из анализа формулы следует, что при $P_i \rightarrow 1$, величина $K_p \rightarrow 1$,
 при $P_i \rightarrow 0$, $K_p \rightarrow \infty$.

Это означает, что резервирование целесообразно применять для элементов, имеющих малую надежность. Кроме того, с увеличением числа резервных элементов эффективность резервирования растет.

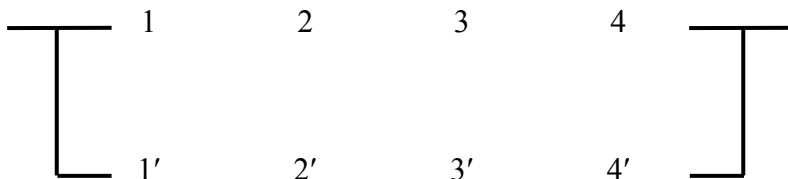
Эффективность разных способов резервирования рассмотрим на примере четырех последовательно соединенных элементов с вероятностью безотказной работы каждого $P_i(t) = P_1(t) = 0,9$:

а) система без резервирования:



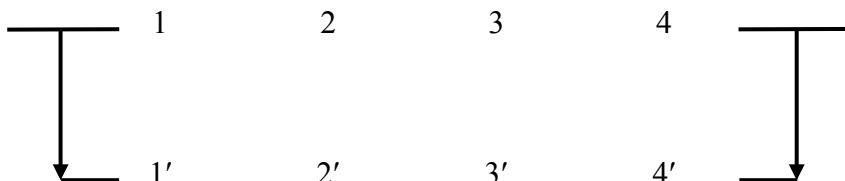
$$P_C(t) = P^4(t) = 0,9^4 = 0,66.$$

б) система с общим постоянным резервированием:



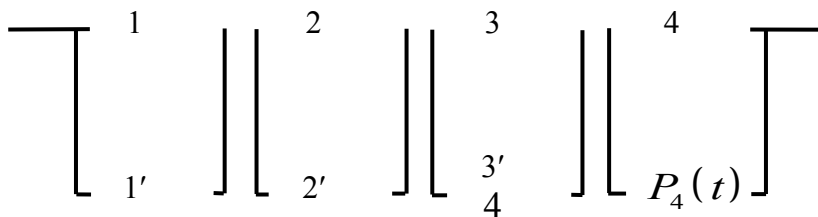
$$P_{pc}(t) < 1 - [1 - P_C(t)]^2 = 1 - (1 - 0,66)^2 = 0,88; \quad K_p = \frac{P_{pc}(t)}{P_C(t)} = \frac{0,88}{0,66} = 1,33.$$

в) система с общим резервированием замещением при надежном переключении:



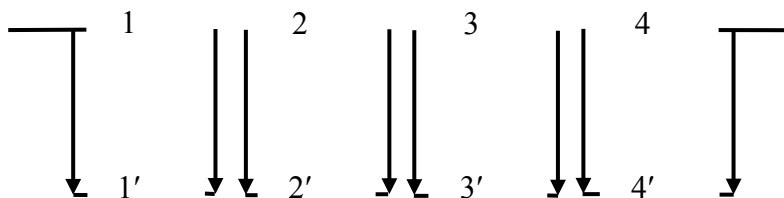
$$P_{pc}(t) < 1 - \frac{[1 - P_C(t)]^2}{2!} = 1 - \frac{0,34^2}{2} = 0,94; \quad K_p = \frac{0,94}{0,66} = 1,424.$$

г) раздельное постоянное резервирование каждого элемента системы:



$$P_{pc}(t) < 1 - [1 - P(t)^2]^4 = [1 - (0,1)^2]^4 = 0,98; \quad K_p = \frac{0,98}{0,66} = 1,454.$$

д) раздельное резервирование замещением каждого элемента системы:



$$P_{pc}(t) = \left[1 - \frac{1 - P(t)^2}{2!} \right]^4 = \left[1 - \frac{0,1^2}{2} \right]^4 = 0,98; \quad K_p = \frac{P_{pc}(t)}{P_c(t)} = \frac{0,98}{0,66} = 1,485.$$

Пример наглядно показывает, что раздельное резервирование намного эффективнее общего, а резервирование замещением при надежном переключении эффективнее постоянного.

Целесообразность того или иного типа резервирования определяется не только техническими, но и экономическими соображениями. Последние в наибольшей мере определяют также кратность и тип резервирования в целом.

С одной стороны, резервирование повышает безотказность и, следовательно, снижает эксплуатационные затраты, с другой стороны, эти мероприятия повышают стоимость изготовления, вес машины.

4.8 Определение надежности объекта при помощи метода логических схем

При оценке надежности многоэлементных систем, выполняющих сложные функции, применяется метод логических схем [10, 20].

При определении надежности данным методом необходимо вычертить принципиальную схему системы с указанием условной безотказности ее работы, графическую схему безотказной работы, указать исходные данные надежности отдельных элементов.

Анализ надежности системы производится следующим образом.

1. Формулируются условия безотказной работы системы в целом в зависимости от сочетания возможности появления отказов ее отдельных элементов.

2. Строится логическая схема условной безотказной работы системы с цепочкой логических связей ее работоспособности.

3. Составляется алгебраическое уравнение событий безотказной работы и расчетное уравнение вероятностей с использованием методов алгебры логики (алгебра Буля).

4. Производится подбор и подготовка количественных характеристик надежности элементов, входящих в систему.

5. Определяется вероятность безотказной работы системы в целом и отдельных ее частей.

Рассмотрим применение метода на примере механической системы, состоящей из 2-х параллельно включенных фильтров Φ_1 и Φ_2 и 2-х агрегатов, включенных последовательно с фильтрами. Определим вероятность безотказной работы системы, приведенной на рисунке 4.11.

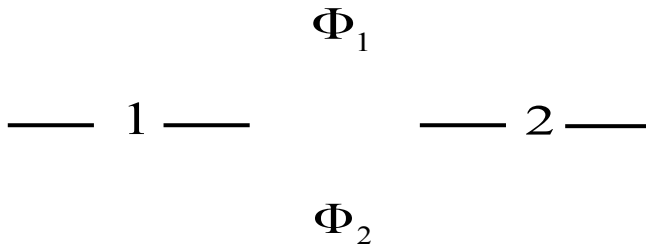


Рис. 4.11 – Анализируемая система с двумя фильтрами

Каждый фильтр может иметь по два вида отказа: отказ по засорению сеток Q_ϕ и отказ по разрыву сеток. Проанализируем надежность по описанной схеме.

1) система будет работать безотказно (событие А) если:

а) все элементы работают безотказно, (событие В);

б) произойдет отказ по засорению одного фильтра, при условии безотказной работы других элементов (событие С);

в) произойдет отказ по засорению второго фильтра, при условии безотказной работы других элементов (событие D).

Отказ по разрыву сеток недопустим, т.к. при этом не будет обеспечиваться очистка рабочей жидкости от механических примесей.

2) логическая схема безотказной работы системы будет иметь следующий вид (рис. 4.12).

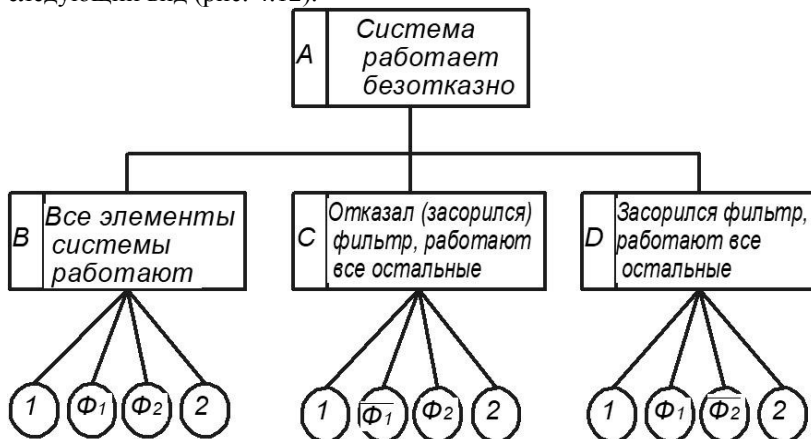


Рис. 4.12 – Дерево событий для рассматриваемой системы

На схеме введены обозначения: 1, Φ_1 , Φ_2 , 2 – работоспособное состояние элемента; $\bar{\Phi}_1$, $\bar{\Phi}_2$ – засорение фильтра.

3. Алгебраическое уравнение безотказности будет иметь следующий вид:

$$S = 1 \cdot \Phi_1 \Phi_2 \cdot 2 + 1 \cdot \bar{\Phi}_1 \Phi_2 \cdot 2 + 1 \cdot \Phi_1 \bar{\Phi}_2 \cdot 2.$$

4. Подбор и подготовка количественных характеристик надежности элементов, входящих в систему зависит от многих факторов. Зачастую, при экспоненциальном распределении

вероятностей отказов в качестве исходных данных даются интенсивности отказов λ .

Тогда, исходя из формулы:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t; \quad Q = 1 - P(t) \approx \lambda t.$$

5. Вероятность безотказной работы отдельных частей и системы в целом:

$$P_B = P_1 \cdot P_{\Phi_1} \cdot P_{\Phi_2} \cdot P_2;$$

$$P_C = P_1 \cdot Q_{\Phi_1} \cdot P_{\Phi_2} \cdot P_2;$$

$$P_D = P_1 \cdot P_{\Phi_1} \cdot Q_{\Phi_2} \cdot P_2;$$

$$P_B = P_B + P_C + P_D.$$

Анализ доли участия в надежности системы позволяет выявить слабые элементы и влиять на них. Общий вид схемы (рис. 4.12) напоминает дерево, поэтому данный метод еще именуют методом дерева событий.

4.9 Расчет надежности методом дерева отказов

Этот метод является частным случаем метода дерева событий. В этом случае выбирается одно, нежелательное событие и, в логической последовательности, рассматриваются причины, которые приводят к нему [4, 5, 15].

В методике логических схем используется ряд логических символов и символов событий (табл. 7).

Анализ опасностей с помощью «дерева причин» потенциальной аварии (АОДП) или идентичного ему «дерева отказов» позволяет выявить комбинации отказов (неполадок) оборудования, ошибок персонала и внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящих к основному событию, т.е. аварийной ситуации.

Метод используется для анализа возникновения аварийной ситуации и расчета ее вероятности (на основе задания вероятностей исходных событий).

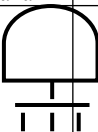
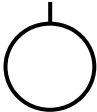
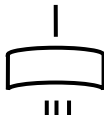

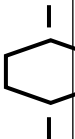
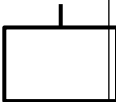
Анализ опасных ситуаций с помощью «дерева» выполняют в следующем порядке:

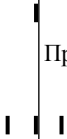
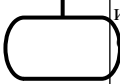
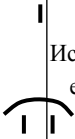

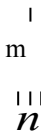

– выбирают потенциальную аварию или отказ, который может привести к аварии;

– выявляют все факторы, которые могут привести к заданной аварии, включая все потенциальные инциденты;

– по результатам этого анализа строят ориентированный граф-«дерево», вершина (корень) которого занумерована потенциальной аварией.

Таблица 7 – Логические символы и символы событий

Логические символы			Символы событий	
Символ логического знака	Название логического знака	Причинная Взаимосвязь	Символ события	Содержание события
	«и»	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно		Исходное событие, обеспеченное достаточными данными
	«или»	Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий		Событие, недостаточно детально разработанное
	«запрет»	Наличие входа вызывает появление выхода тогда, когда происходит условное событие		Событие, вводимое логическим элементом

	Приоритетное «и»	Выходное событие имеет место, если все входные события происходят в нужном порядке слева направо		Условное событие, используемое логическим знаком «запрет»
	Исключающая «или»	Выходное событие происходит, если случается одно (но не оба) из входных событий		Событие, которое может случаться или не случаться
	« m из n »	Выходное событие происходит, если случается « m » из « n » входных событий		Символ перехода

Пример использования наиболее применяемых логических символов приведен на рисунках 4.12, 4.13.

Расчет вероятности появления венчающего события проводится по формуле:

$$P_A = P_1 \cdot P_1 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (4.16)$$

Вероятность события A , в зависимости от исходных событий, соединенных символом «ИЛИ», (рис. 4.13) определяется по формуле:

$$P_A = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot \dots \cdot (1 - P_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (4.17)$$

Рассмотрим изложенный методический подход на примере станка сверлильно-расточной группы. Основным движением для него является главное движение резания, т.е. вращение инструмента и движение подачи.

A

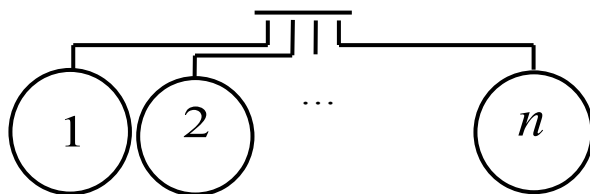


Рис. 4.13 – Применение логического символа «И»

A

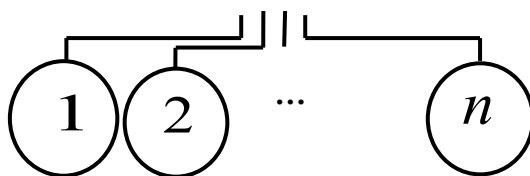


Рис. 4.14 – Применение логического символа «ИЛИ»

Требуется оценить вероятность отказа станка.

Отказ станка может произойти из-за функционального отказа, явившегося следствием внезапных отказов блоков, узлов, деталей или из-за параметрического отказа, который произойдет, когда будет исчерпана технологическая надежность. Функциональный отказ может иметь место, если будут реализованы приводимые ниже прогнозируемые причинно-следственные цепи опасностей (рис. 4.15).

Обозначения причин, вызывающих в конечном итоге функциональный отказ станка:

- 1 – отказ электродвигателя;
 - 2 – отказ концевого выключателя;
 - 3 – короткое замыкание кабеля на землю;
 - 4 – отказ предохранителя;
 - 5 – короткое замыкание на корпус;
 - 6 – отказ насоса;
 - 7 – поломка пружины клапана;
 - 8 – отказ дросселя;
 - 9 – отказ обратного клапана;
 - 10 – отказ предохранительного клапана;
 - 11 – утечки маслопровода;
 - 12 – отказ муфты главного двигателя;
 - 13 – отказ муфты первого вала коробки скоростей;
 - 14 – отказ зубчатых колес коробки скоростей;
 - 15 – отказ ограничителя передвижных зубчатых колес коробки скоростей;
 - 16 – отказ шестерен коробки передач;
 - 17 – отказ муфты сцепления шестерен коробки подач.
- Расчет проводится аналогично тому, как это показано ранее.

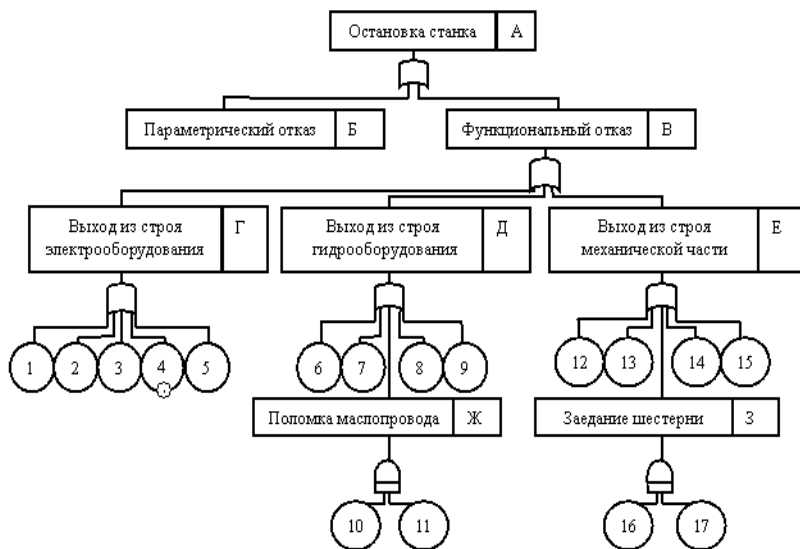


Рис. 4.15 – Дерево отказов для металлорежущего станка

Анализ дерева отказов состоит в выявлении условий, минимально необходимых и достаточных для возникновения или не возникновения головного (венчающего) события.

4.10 Схемная надежность изделия

После составления функциональной или структурной схемы изделия следует оценить возможные отказы и пути их предупреждения за счет усовершенствования самой схемы изделия. Это и есть обеспечение его схемной надежности [30, 36].

Анализ схемы может быть качественным или содержать количественные оценки.

Приведем пример качественного анализа на примере системы смазки двигателя автомобиля (рис. 4.16). Ее основой являются масляный насос 1, фильтр 2, масляный радиатор 3.

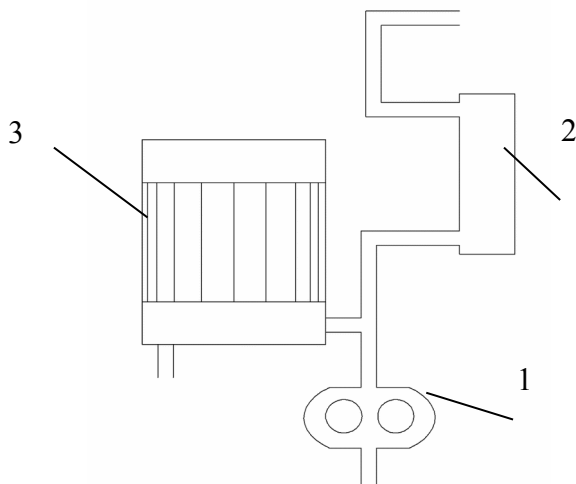


Рис. 4.16 – Система смазки двигателя автомобиля

Практические наблюдения и данные испытаний подсказывают возможность следующих отказов:

- течь масла вследствие чрезмерного давления, создаваемого насосом при повышенных оборотах двигателя из-за засорения фильтра;

- выход из строя подшипников двигателя при повышенных нагрузках и в жаркую погоду вследствие того, что давление масла падает и жидкое маловязкое масло стекает через радиатор, не попадая в главную магистраль.

- течь в масляном радиаторе.

С опасностью таких отказов можно бороться, улучшив схему системы смазки (рис. 4.17):

- для защиты системы от чрезмерного давления масла можно ввести редукционный клапан 4;

- на случай, если фильтр засорился, предусматривается перепускной клапан 5, он будет пропускать часть масла нефilterованной, зато будет исключена возможность выплавления подшипников;

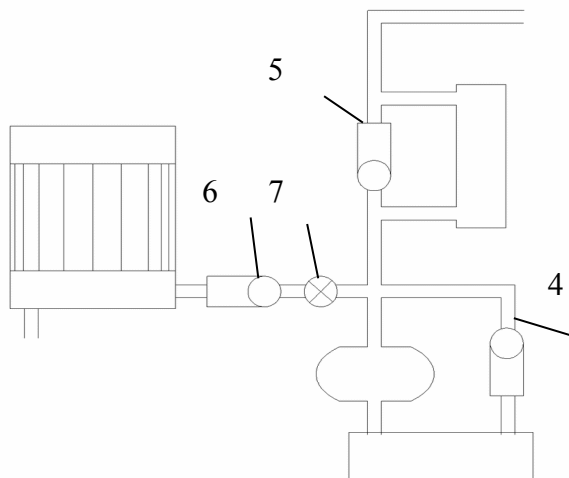


Рис. 4.17 – Система смазки двигателя автомобиля после анализа

– слив масла через радиатор можно устранить, установив предохранительный клапан 6. Тогда масло пойдет в радиатор только в том случае, если давление после насоса достигнет заданной величины, достаточной для надежной смазки всех трущихся поверхностей;

– избежать течи масла в радиаторе можно за счет установки крана 7.

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

4.11 Надежность восстанавливаемых систем

4.11.1 Надежность систем с основным соединением элементов

Отказ системы с основным соединением наступает при отказе любого из « k » его элементов; элемент после отказа восстанавливается и тем самым восстанавливается работоспособность всей системы [27-29].

Вероятность возникновения « n » отказов системы в промежутке времени между t_1 и t_2 вычисляется по формуле Пуассона:

$$P(t_1, t_2) = \frac{[\omega(t_2) - \omega(t_1)]^n}{n!} \cdot e^{-(\omega(t_2) - \omega(t_1))}, \quad (4.18)$$

где $\omega(t_2) = \sum_{i=1}^k \omega_i(t_2)$; $\omega(t_1) = \sum_{i=1}^k \omega_i(t_1)$ – параметры потоков отказов системы за время t_2 и t_1 соответственно, k – число элементов в системе.

Вероятность безотказной работы системы, (т.е. $n=0$) в том же промежутке времени определяется по формуле:

$$P(t_1, t_2) = e^{-(\omega(t_2) - \omega(t_1))}. \quad (4.19)$$

Для стационарного потока отказов, т.е. $\omega = const$ формула упрощается:

$$P(t_1, t_2) = e^{-\omega(t_2 - t_1)}. \quad (4.20)$$

При расчете надежности восстанавливаемых систем обычно пользуются методом, основанном на составлении графа переходов системы в различные состояния. Для систем с основным соединением элементов в простейшем случае можно указать два состояния: работоспособное – 1 и отказ – 2 (рис. 4.18).

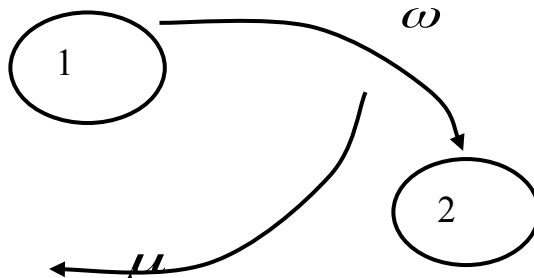


Рис. 4.18 – Граф переходов восстанавливаемой системы в различные состояния: 1 – работоспособное состояние; 2 – неработоспособное состояние

Такой граф (рис. 4.18) описывается системой дифференциальных уравнений вероятностей состояний:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -\omega \cdot P_1(t) + \mu \cdot P_2(t) \\ \frac{dP_2}{dt} &= \omega \cdot P_1(t) - \mu \cdot P_2(t) \end{aligned} \right\}, \quad (4.21)$$

где: P_1 – вероятность работоспособности; P_2 – вероятность отказа.

Решение этой системы относительно вероятности работоспособности, или, что тоже самое, коэффициента готовности, имеет вид:

$$P_1(t) = K_G = \frac{\mu}{\omega + \mu} + \frac{\omega}{\omega + \mu} \cdot e^{-(\omega + \mu)t} \approx \frac{\mu}{\omega + \mu}. \quad (4.22)$$

Показатели долговечности, выраженные в календарном времени работы, позволяют непосредственно использовать их в планировании сроков организации ремонтов, поставки запасных частей, сроков замены оборудования.

4.11.2 Надежность систем с резервированным соединением

Расчет надежности таких систем с учетом восстановления также удобно вести с использованием графа переходов.

Граф переходов для системы, состоящей из « n » параллельно соединенных элементов можно представить рисунком 4.19.

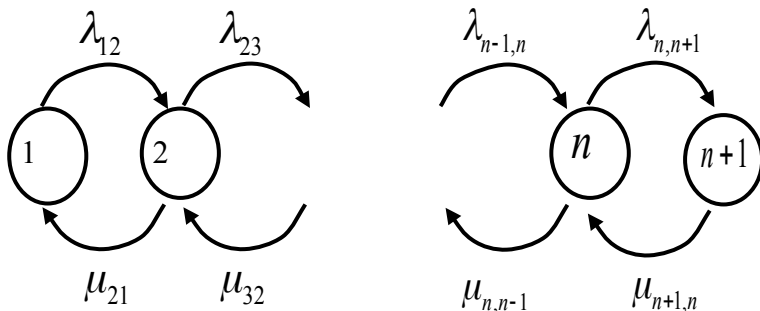


Рис. 4.19 – Граф переходов системы с резервированием в различные состояния

Число возможных состояний системы (рис. 4.19) равно $n + 1$.

Обозначим состояния:

- 1 – все элементы системы исправны;
- 2 – один элемент отказал;
- 3 – два элемента отказали;
- $n + 1$ – все n элементов отказали.

После составления графа переходов записывают дифференциальное уравнение состояний. Каждое состояние, кроме последнего « $n + 1$ »-го является работоспособным, поэтому коэффициент готовности определяется суммой вероятностей:

$$K_g = \sum_{i=1}^n P_i, \text{ для «} n \text{» состояний системы.}$$

Решение системы уравнений состояний позволяет получить выражения для вероятностей каждого состояния:

– вероятность первого состояния (все элементы исправны):

$$P_1 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{12}}{\mu_{21}} + \frac{\lambda_{23} \cdot \lambda_{12}}{\mu_{32} \cdot \mu_{21}} + \dots + \frac{\lambda_{n,n+1} \dots \lambda_{12}}{\mu_{n+1,n} \dots \mu_{21}}}; \quad (4.23)$$

– вероятности остальных соединений:

$$P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\mu_{21}} \cdot P_1, \quad P_3 = \frac{\lambda_{23} \cdot \lambda_{12}}{\mu_{32} \cdot \mu_{21}} \cdot P_1, \quad \dots \quad P_{n+1} = \frac{\lambda_{n,n+1} \cdot \lambda_{n-1,n} \dots \lambda_{12}}{\mu_{n+1,n} \cdot \mu_{n,n-1} \dots \mu_{21}} \cdot P_1. \quad (4.24)$$

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

4.12 Надежность систем с плановым техническим обслуживанием

Расчет надежности восстанавливаемых систем с плавным обслуживанием выполняется аналогично расчету надежности необслуживаемых систем. Разница в расчете заключается лишь в том, что увеличивается число состояний системы – появляются состояния, когда некоторые части системы будут находиться в положении технического обслуживания (ТО) [1, 7, 10, 20].

Процесс ТО заключается в восстановлении уровня надежности системы до заданного после отработки системой заранее установленного периода T между ТО.

За период T надежность (вероятность безотказной работы) понижается с заданного уровня $I - P_I(t)$ до предельно-допустимого $II - P_{II}(t)$, после чего проводятся ТО, в процессе которых надежность вновь повышается до I уровня (рис. 4.20).

Таким образом, проведение ТО с одной стороны, понижает комплексный показатель надежности – коэффициент технического использования $K_{т.и.}$, а с другой стороны – повышает вероятность безотказной работы $P(t)$.

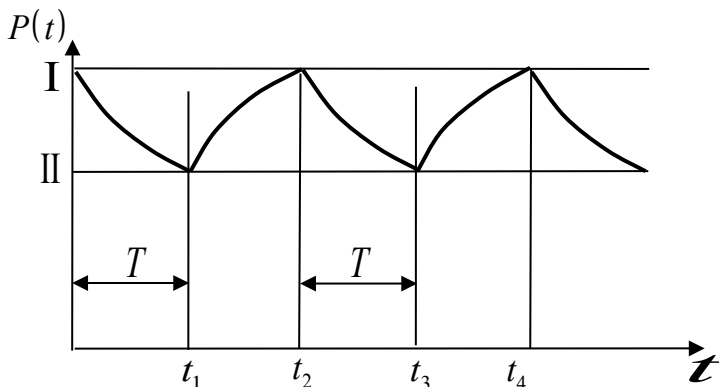


Рис. 4.20 – Обеспечение надежности систем с плановым техническим обслуживанием

В этом случае в качестве показателя надежности системы применяется обобщенный коэффициент технического использования R , определяемый из выражения:

$$R = K_{m.u.} \cdot P_1(t). \quad (4.25)$$

Планирование периодичности и продолжительности ТО должно быть таким, чтобы R был максимальным.

5. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

5.1 Особенности приложения теории надежности к вопросам прочности

В основу расчетов надежности заложено то, что каждый элемент обладает определенной прочностью по отношению к нагрузкам.

Однако, способ проектирования, основанный только на применении запаса прочности n , не позволяет судить о вероятности отказа элемента, так как при одном и том же значении запаса прочности вероятность отказа может колебаться в весьма широких пределах [20, 22-26].

Ясно, что обычный детерминистский подход к проектированию не является удовлетворительным с точки зрения анализа надежности. Необходима другая методика проектирования, которая бы учитывала вероятностный характер конструктивных параметров. В этом случае в явном виде задаются все конструктивные параметры, которые, в свою очередь, определяют распределения напряжения $f(S)$ и прочности $f(R)$ (рис. 5.1).

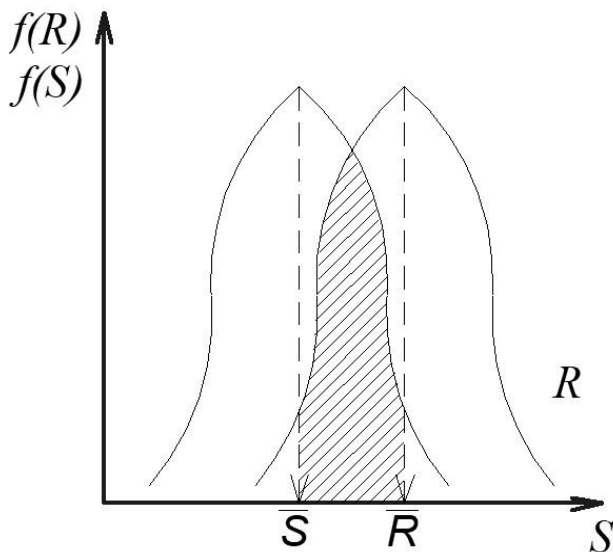
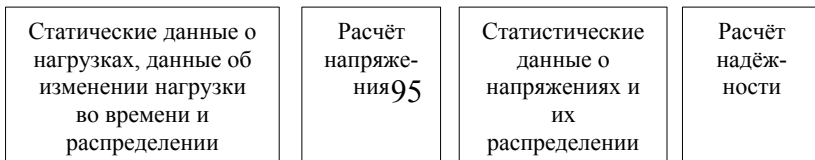


Рис. 5.1 – Определение запаса прочности объекта

Если оба распределения определены, то можно легко вычислить вероятность безотказной работы элемента. На рисунке 5.2 схематично определена методика такого расчета.

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 [1, 7, 22-26].



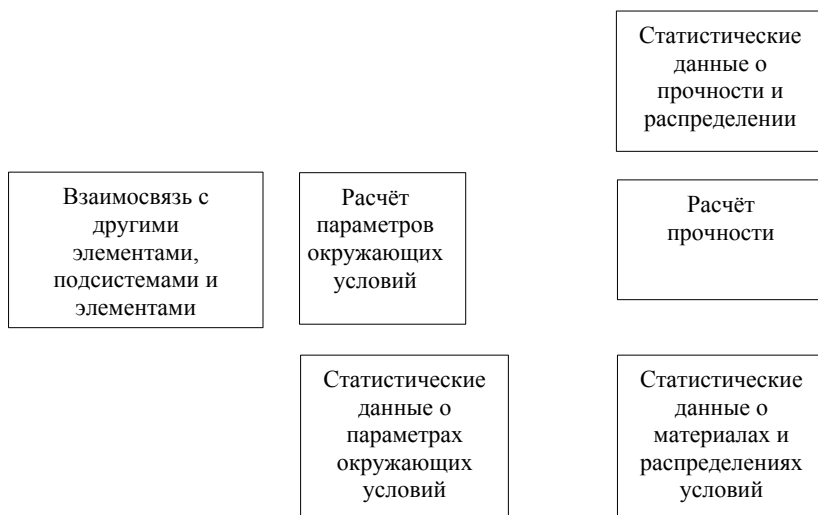


Рис. 5.2 – Методика расчёта вероятности безотказной работы элемента

При обнаружении конструктивных недостатков, снижающих уровень надёжности системы, проводят конструктивные изменения и корректируют техническую документацию.

5.2 Нагрузки в механических системах

Нагрузки в механических системах делятся на нагрузки от сил тяжести, динамические, ветровые, сейсмические, от снега и обледенения, сил сопротивления движению и т.п.

При расчетах выделяют три основных расчетных случая:

I – нормальные нагрузки в рабочем состоянии: масса машины, масса груза (пассажиры, объект на крюке крана), динамические нагрузки при пуске и торможения, среднее давление ветра и др.;

II – на механизм действуют максимальные нагрузки в рабочем состоянии;

III – на механизм действуют максимальные нагрузки в нерабочем состоянии, например, кран на открытой площадке.

По нагрузкам, в зависимости от расчетной схемы, рассчитываются детали на прочность (для сталей – относительно предела текучести, для чугунов – предела прочности) и на выносливость, с обеспечением заданного запаса прочности.

Для крановых механизмов – еще ведется расчет на устойчивость.

Натурные испытания объектов свидетельствуют о том, что подавляющее большинство нагрузок являются случайными величинами или процессами.

Так, например, уровень динамических нагрузок может зависеть от:

- действий человека (темперамент, и т.д.);
- регулировки тормозной аппаратуры, зазоров;
- характера ветрового напора.

Поэтому при расчетах надежности нагрузки рассматривают с позиции общей теории случайных процессов.

Случайный процесс может быть охарактеризован известными нам параметрами:

- математическое ожидание нагрузки;
- дисперсия и среднее квадратическое отклонение;
- коэффициент вариации.

5.3 Распределение несущей способности элементов

Несущая способность детали определяется по зависимости:

$$S_o = \sigma_{np} \cdot F, \quad (5.1)$$

где σ_{np} – предельное напряжение (предел текучести, предел усталости, временное сопротивление); F – геометрический фактор расчетного сечения (момент сопротивления, площадь сечения детали).

Экспериментальные исследования пределов текучести, прочности, усталости и др. свидетельствуют о существенном их разбросе.

Важнейшими причинами этого разброса являются:

- структурная неоднородность металлов одной плавки;
- случайные изменения режимов механической и термической обработки.

Влияют на несущую способность и разброс геометрических характеристик: разброс размеров (радиус галтелей, катеты сварочных сварных швов, диаметры в зонах посадок); случайные изменения проектных форм (непрямолинейность стержней, местный изгиб листовых поверхностей и т.п.).

Несущая способность может меняться с течением времени под влиянием изнашивания, коррозии, развивающихся трещин и др. явлений.

5.3.1 Статистические данные о материалах

Закон распределения пределов выносливости получают в результате испытаний большого количества образцов.

Так, испытав около 100 образцов, можно получить всего 4...5 точек эмпирического распределения.

Пример формирования закона распределения представлен на рисунке 5.3.

Исследования показывают, что такие механические характеристики, как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость – распределяются по нормальным законам.

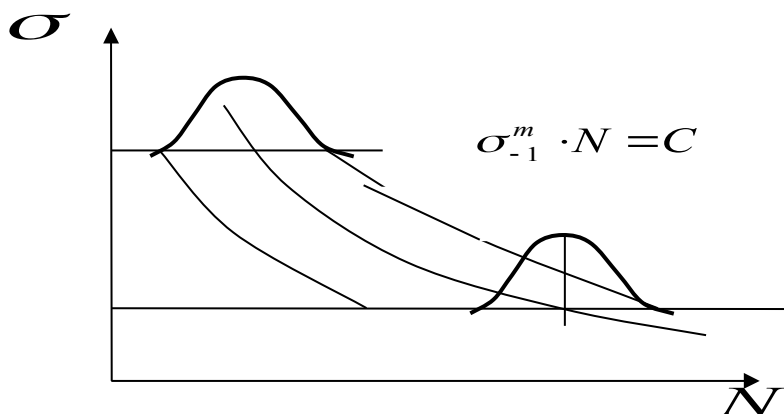


Рис. 5.3 – Формирование закона распределения

Характеристиками его служат: математическое ожидание $M(\sigma)$; среднее квадратическое отклонение S_{-1} ; коэффициент вариации $u = S_{-1}/M(\sigma)$. (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Прочностные характеристики ряда материалов

Марка материала	σ_a		σ_m	
	$M(\sigma)$, Мпа	u	$M(\sigma)$, Мпа	u
20	379	6,9	296	12,5
30	432	7,58	330	11,1
40	454	6,46	284	9,23
30 ХГСА	660	7,1	486	10,5
12 Х18НЮТ	643	11,58	359	14,48

Нормальному распределению подчиняются также наработка на отказ восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий; размеры при изготовлении и погрешности измерения деталей; механические характеристики материалов (пределы текучести, прочности, выносливости) и т.д.

5.3.2 Статистические данные о геометрических размерах

В большинстве случаев отклонения геометрических размеров, являющиеся случайными величинами подчиняются нормальному распределению или могут быть аппроксимированы им [1, 22–26].

Рассмотрим пример задания допуска линейного размера валика (рис. 5.4).

Этот допуск (рис. 5.4) означает, что размер имеет математическое ожидание 2500 мм и среднее квадратическое отклонение 1 мм, соответственно три квадратических отклонения – 3 мм (рис. 5.5).

В производстве такой допуск говорит о том, что 27 деталей из 10 000 (0,27%) выйдут за указанный допуск, т.е. будут изготовлены с браком.

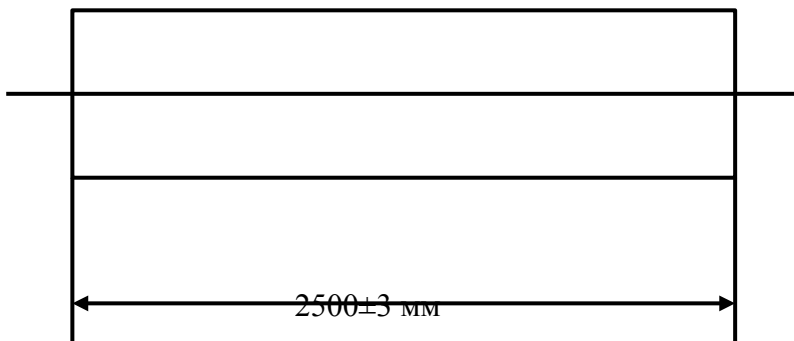


Рис. 5.4 – Деталь с допуском

Детали машины могут быть выполнены с различными допусками на технологические параметры (точность, однородность материала и др.). Отказы, возникающие в процессе испытаний или эксплуатации технических систем, могут быть вызваны неблагоприятным сочетанием вышеперечисленных факторов – рассеянием действующих нагрузок, отклонением от номинального значения механических характеристик материалов, неблагоприятным сочетанием допусков в местах сопряжения и т. п. Поэтому в расчетах надежности различные параметры рассматривают как случайные величины, которые могут принимать то или иное значение, неизвестное заранее [1, 7, 10, 20].

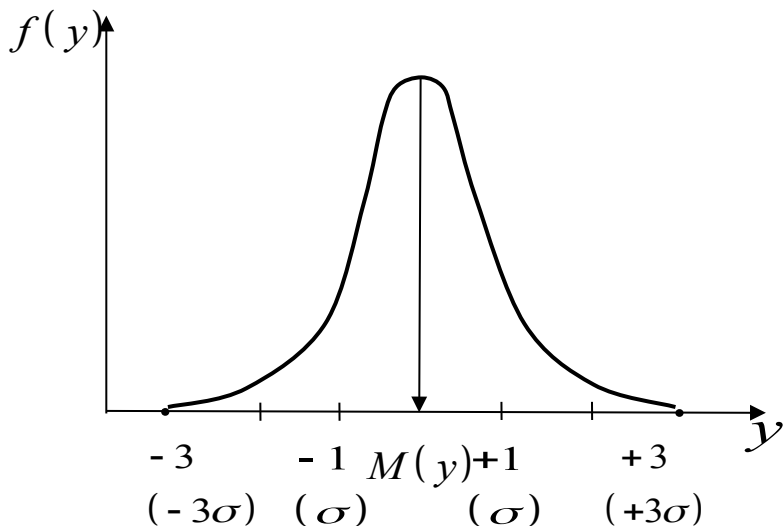


Рис. 5.5 – Геометрическая трактовка допуска, имеющего нормальный закон распределения

Случайный характер размера предопределяет несущую способность, особенно это важно для соединений сборок с натягом, когда от сочетания полей допусков зависит прочность соединения (передаваемые усилия, моменты и др.).

5.4 Методы расчета надежности

5.4.1 Расчет по допускам напряжения

В качестве основного используется следующее уравнение:

$$\sigma = \frac{\sigma_n}{n} = [\sigma], \quad (5.2)$$

где σ – максимальное напряжение в расчетном сечении детали, определяемое по одному из сочетаний нагрузок; σ_n – предельное напряжение в сечении детали (σ_T, σ_1 и т.д.); n – коэффициент запаса прочности; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

Преимущество данного метода – простота вычислений.

Недостатки:

- не учитывается случайный характер σ^n и, следовательно, σ ;
- в расчете отсутствует фактор времени, хотя ясно, чем дольше работает деталь, тем больше вероятность появления разрушающих нагрузок и напряжений.

Все эти недостатки должны быть устранены коэффициентом запаса n , однако его выбор носит субъективный характер. Все это часто приводит или к появлению деталей низкой надежности, или деталей слишком тяжелых и дорогих.

5.4.2 Расчет по методу предельных состояний

Основное уравнение прочности по этому методу записывается в виде:

$$S_p \leq R_n, \quad (5.3)$$

где: $S_p = \sum \alpha_i \cdot S_{H_i} \cdot n_i$ – расчетное (или наибольшее) усилие в рассматриваемом элементе; S_{H_i} – номинальная i -я нагрузка действующая на механизм; α_i – передаточное отношение внешней нагрузки S_{H_i} к рассчитываемой детали; n_i – коэффициент перегрузки, определяемый статистически;

$R_n = F \cdot R_c \cdot m_y$ – предельное усилие (несущая способность);

R_c – расчетное сопротивление элемента (предел текучести, временное сопротивление); F – геометрический параметр (площадь, момент сопротивления); m_y – коэффициент условий работы, учитывающий ответственность элемента, отклонение от номинальных размеров, точность расчета.

Достоинство метода предельных состояний – вероятностная оценка нагрузок и несущей способности.

Недостатки метода:

- нагрузки рассматриваются как случайные величины, а не процессы;
- отсутствует фактор времени.

5.4.3 Вероятностный метод расчета

При вероятностных расчетах элементы машин делятся на две группы:

I группа – узлы и детали, отказ которых влечет за собой аварийные последствия;

II группа – все остальные.

Для деталей первой группы в качестве основного показателя надежности принимают вероятность безотказной работы в течение времени t .

При этом, вероятность безотказной работы в течение времени t определяется следующей зависимостью:

$$P(t)_{t=T_p} \geq [P] \quad (5.4)$$

где: T_p – расчетное время работы рассматриваемой детали;
 $[P]$ – нормативное значение вероятности безотказной работы;
 $[P]$ задается с учетом возможных последствий отказа детали и на основе обобщения опыта эксплуатации машин. Например, для элементов подъемно-транспортных машин $[P] \geq 0,99$.
В тех случаях, когда отказ детали может привести к несчастному случаю $[P] \geq 0,9999$.

Нормативная вероятность безотказной работы элементов может назначаться из условия обеспечения заданной надежности всей системы, в которую входит элемент.

Для деталей второй группы, отказы которых не имеют аварийных последствий, основной характеристикой надежности является средний ресурс между заменами или ремонтами $\lambda(t)$, который определяется следующей зависимостью:

$$T_{cp} \geq [T_{cp}], \quad (5.5)$$

где: $\lambda(t)$ – нормативный, средний ресурс между заменами и ремонтами.

В общем случае $[T_{cp}]$ экономически обосновывается путем минимизации годовых приведенных затрат, например, стреловая металлоконструкция крана – 20 лет, подшипники качения – 10 лет.

Рассмотрим, как формируется структура вероятности безотказной работы элементов первой группы. Все факторы, влияющие на этот показатель надежности, могут быть разделены на две категории:

I категория – нормальные эксплуатационные и производственно-технологические факторы (нагрузки, напряжения, и т.д.), тогда вероятности безотказной работы элементов первой группы определяются следующей зависимостью:

$$P_1(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t), \quad (5.6)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ – вероятности безотказной работы соответственно по условиям статической прочности, циклической прочности и изнашивания.

II категория – нарушения правил технической эксплуатации (ПТЭ) и реализация скрытого брака. При этом вероятность безотказной работы по условию отсутствия нарушений ПТЭ, как показывает статистика, определяется формулой:

$$P_3(t) = e^{-t/T_3}, \quad (5.7)$$

где T_3 – среднее время между отказами из-за нарушений ПТЭ.

Вероятность безотказной работы по условию отсутствия брака определяется формулой:

$$P_6(t) \approx \frac{n_r}{n_r + n_6}, \quad (5.8)$$

где n_r – количество годных деталей, находящихся в эксплуатации;
 n_6 – количество деталей с браком, ошибочно принятых за годные.

Поскольку отказы из-за нарушений ПТЭ – независимые случайные события, то вероятности безотказной работы элементов второй группы определяются следующей зависимостью:

$$P_{II}(t) = P_3(t) \cdot P_6(t). \quad (5.9)$$

Общая вероятность безотказной работы детали определяется следующим образом:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_{II}(t). \quad (5.10)$$

Для деталей второй группы $\lambda(t)$ может определяться по условию статической или циклической прочности или по изнашиванию.

Вероятностные расчеты по условию статической прочности (по условию превышения нагрузок предельного уровня) могут иметь ряд разновидностей:

1. *Нагрузка на изделие* – постоянная величина, характеристика прочности изделия – случайная величина, заданная интервалом с предельными значениями $R_{\min} \dots R_{\max}$. Тогда нагрузка на изделие определится зависимостью:

$$\bar{R} = \frac{R_{\min} + R_{\max}}{2}, \quad (5.11)$$

Считая прочность изделия подчиненной нормальному закону, найдем среднее квадратическое отклонение по правилу 3σ :

$$R_{\max} - R_{\min} \approx 6\sigma_R \Rightarrow \sigma_R = \frac{R_{\min} + R_{\max}}{6}. \quad (5.12)$$

Расчетное значение характеристики прочности получим по формуле:

$$R_{расч} = \bar{R} + u_q \cdot \sigma_p, \quad (5.13)$$

где u_q – значение квантиля, отвечающее заданной вероятности отказа q . Геометрически эта область представлена на рисунке 5.6.

2. *Нагрузка на изделия* и характеристика прочности изделия заданы случайными величинами. Законы распределения – нормальные, по правилу 3σ (рис. 5.7).

Среди возможных значений прочности R и нагрузки S могут оказаться такие, что $R < S$, при этом произойдет разрушение изделия (рис. 5.7).

Условие разрушения записывается в виде:

$$z = R - S < 0. \quad (5.14)$$

Вероятность отказа Q будет соответствовать случаю $z < 0$:

$$Q = F(u_z)_{z=0} = F\left(\frac{z - \bar{z}}{\sigma_z}\right) = F\left(\frac{-\bar{z}}{\sigma_z}\right) = 0,5 - \Phi\left(\frac{\bar{z}}{\sigma_z}\right), \quad (5.15)$$

где: Φ – интеграл Лапласа.

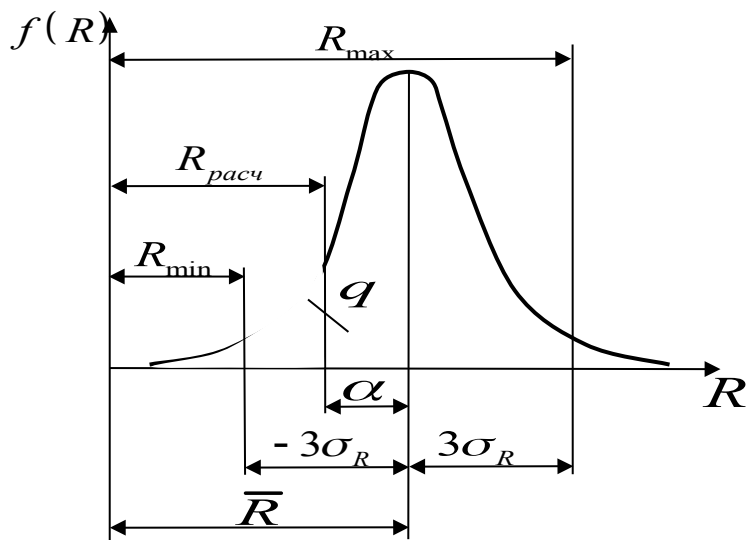


Рис. 5.6 – Определение вероятности неразрушения для первого типа нагрузок

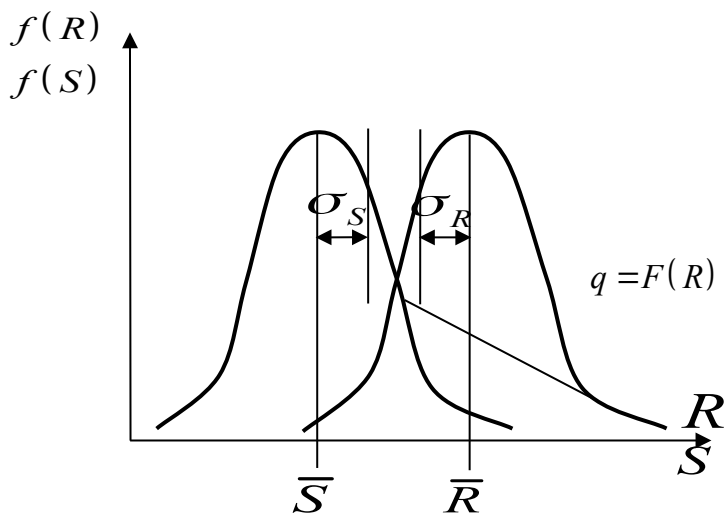


Рис. 5.7 – Определение вероятности неразрушения для второго типа нагрузок

Величина Z также является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с характеристиками $\bar{z} = \bar{R} - \bar{S}$; $\sigma_z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2$ (рис. 5.8).

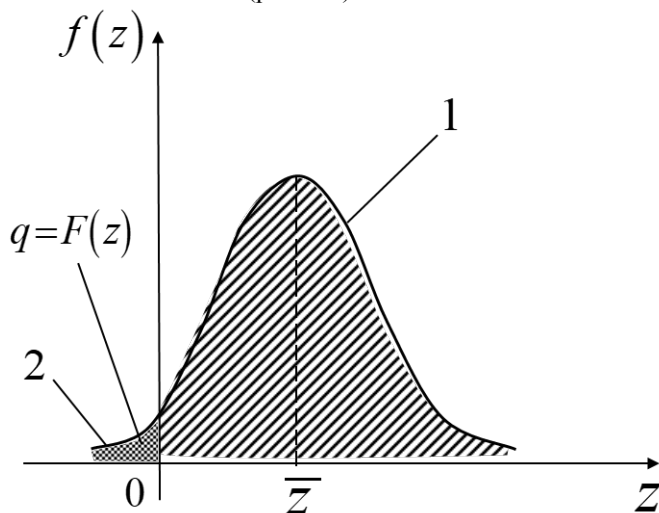


Рис. 5.8 – Графическое представление условия отказа (разрушения): 1 – вероятность безотказной работы; 2 – вероятность отказа

Вероятность безотказной работы определяется выражением:

$$P = 1 - Q = 0,5 + \Phi\left(\frac{\bar{z}}{\sigma_z}\right) = 0,5 + \Phi\left(\frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right). \quad (5.16)$$

Разделим числитель и знаменатель в интеграле Лапласа на \bar{S} :

$$P = 0,5 + \Phi\left(\frac{\frac{(\bar{R} - \bar{S})}{\bar{S}}}{\frac{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}{\bar{S}}}\right). \quad (5.17)$$

$$\bar{n} = \frac{\bar{R}}{\bar{S}}$$

Введем показатель $\bar{n} = \frac{\bar{R}}{\bar{S}}$ – средний запас прочности. Тогда вероятность безотказной работы определится выражением:

$$P = 0,5 + \Phi \left(\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 \cdot \frac{\sigma_R^2}{R^2} + \frac{\sigma_S^2}{S^2}}} \right) = 0,5 + \Phi \left(\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 \cdot \nu_R^2 + \nu_S^2}} \right) \quad (5.18)$$

Эти выражения связывают запас прочности и вероятность неразрушения.

В выражении (5.18) ν_R и ν_S – коэффициенты вариации нагрузки и прочности соответственно.

Обычно на систему в целом задается по техническим условиям вероятность ее разрушения (неразрушения) и, при расчетах, запас прочности выбирается с учетом этой вероятности.

Рассмотрим методику выбора запаса прочности по заданной вероятности неразрушения на примере теплообменника (рис. 5.9):

1. Составляется структурная схема конструкции в целом. Поскольку выход из строя любого из упомянутых элементов приводит к выходу из строя всего теплообменника, то это будут последовательно соединенные элементы (рис. 5.10).

Вероятность неразрушения всей конструкции (рис. 5.9 и 5.10) будет описываться формулой:

$$P = \prod_{i=1}^k P_i \quad (5.19)$$

где P_i – вероятность неразрушения каждого звена; k – число звеньев в конструкции, для указанного примера k – равно пяти.

2. Исходя из принципа одинаковой надежности всех звеньев, находим вероятность неразрушения каждого звена:

$$P_i = \sqrt[k]{P} \quad (5.20)$$

где P – заданная вероятность неразрушения на всю конструкцию. С учетом (5.19) имеем:

$$P_i = 0,5 + \Phi \left(\frac{\bar{n}_i - 1}{\sqrt{\bar{n}_i^2 \cdot v_{R_i}^2 + v_{S_i}^2}} \right) = 0,5 + \Phi \left(\frac{1}{v_{z_i} u} \right). \quad (5.21)$$

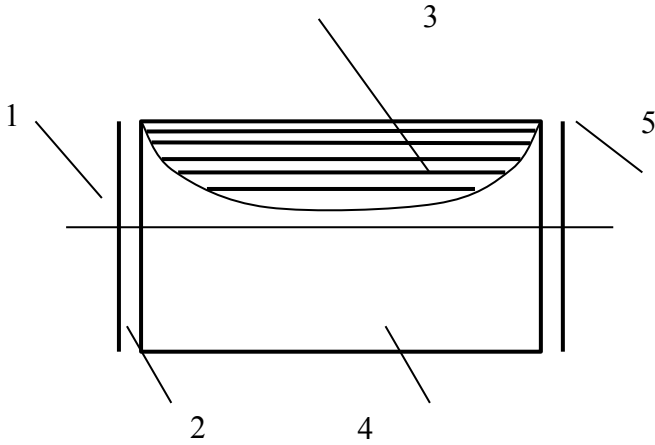


Рис. 5.9 – Схема теплообменника:
 1, 5 – эллиптическое днище; 2 – трубная доска; 3 – трубки теплообменника; 4 – оболочка корпуса

1 2 3 4 5

Рис. 5.10 – Структурная схема теплообменника

Отсюда определяем коэффициент вариации (5.22):

$$v_{z_i} = \frac{\sqrt{\bar{n}_i^2 \cdot v_{R_i}^2 + v_{S_i}^2}}{\bar{n}_i - 1},$$

(5.22)

и запас прочности изделия:

$$\bar{n}_i = \frac{-v_{z_i}^2 \pm \sqrt{v_{z_i}^2 \cdot v_{R_i}^2 - v_{S_i}^2 (v_{R_i}^2 - v_{z_i}^2)}}{v_{R_i}^2 - v_{z_i}^2}. \quad (5.23)$$

3. По вероятности неразрушения P_i и таблицам значений интеграла Лапласа $\Phi(z)$ определяем v_{z_i} .

4. Из справочников по статистическим свойствам материалов находим v_{R_i} , из прочностных расчетов v_{S_i} .

5. Рассчитываем \bar{n}_i и сравниваем со средним значением.

Оценка надежности систем, испытывающих вибрации, в значительной степени основана на анализе случайных выбросов колебательных процессов и связанных с ними процессов накопления повреждений.

Цель расчета на вибрацию и проектирование виброзащитных систем состоит в том, чтобы свести к минимуму или к допустимому пределу уровни вибрации и вибронапряженности в машинах с учетом случайности параметров и процессов.

Мерой вибронапряженности служит максимальная величина виброускорения $W(t)$, другая мера – виброперемещения.

Прочность системы оценивают величиной вибронапряженности, возникающей в элементах.

Поскольку вибрационное нагружение, которое в конечном счете приводит к отказу элемента системы, обычно сопровождается накоплением повреждений, то более полный расчет основан на рассмотрении процесса накопления повреждений, при этом учитывают меру повреждения: остаточные деформации, размеры трещин (микротрещин) и др. дефекты.

Отметим, что вибрации, даже если они не являются непосредственной причиной отказов, могут оказаться катализатором процессов приближения к отказам.

Опуская выводы, укажем, что коэффициент запаса циклической прочности определяется по формуле:

$$n = \frac{1}{1 - x \cdot v_{.1} \sqrt{2}}, \quad (5.24)$$

где: v_{-1} – коэффициент вариации предела усталости, определяется

выражением $v_{-1} = \frac{\sigma_{-1}}{R_{-1}}$, σ_{-1} – среднеквадратическое отклонение предела выносливости; R_{-1} – математическое ожидание предела выносливости; x – коэффициент, определяется выражением

$x = \frac{\sigma}{R_{\max}}$; σ – среднеквадратическое отклонение амплитуды нагружения; R_{\max} – максимальная амплитуда нагружения, определяемая по максимальным нагрузкам.

Изнашивание – процесс постепенного изменения размеров и формы детали при трении.

Износ является причиной выхода из строя подавляющего большинства (80-90%) машин и их деталей. Он ограничивает долговечность машин по разным условиям работоспособности:

- потере точности (приборы, направляющие изделий);
- понижению коэффициента полезного действия (из-за утечек и т.д.);
- понижению прочности (уменьшению сечений, увеличению динамических нагрузок);
- повышению шума (трансмиссии);
- полному исчерпанию работоспособности (истирание тормозных колодок, шин и т.д.).

Изнашивание зависит от времени и является нестационарным случайным процессом.

Показателем изнашивания является скорость изнашивания $V_u(t) = u(t)/t$, где $u(t)$ – величина износа (Рис. 5.11).

Рассматривая Рис. можно выделить три характерных участка:

- I – приработка трущихся поверхностей;
- II – установившееся изнашивание;
- III – катастрофическое изнашивание.

Предельным износом называется такое состояние, при котором дальнейшая эксплуатация детали или сопряжения прекращается во избежание поломки детали или существенного снижения эффективности машины.

В ряде случаев предельные износы могут быть рассчитаны. Упрощенно величину износа можно представить в виде формулы:

$$u(t) = b_u + a_u \cdot t^\alpha, \quad (5.25)$$

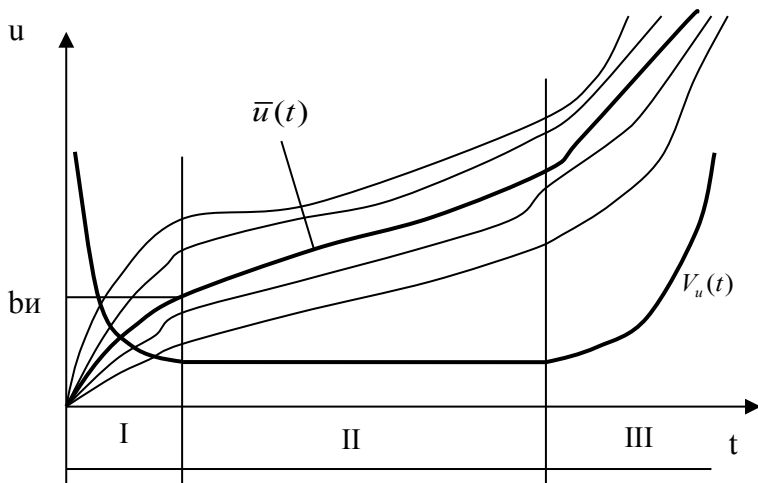


Рис. 5.11 – Процесс изнашивания деталей машин

где: b_u – величина износа в конце участка приработки;
 a_u – зависит от свойств поверхности, условий работы и др.;
 α – показатель степени, представлен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Величина коэффициента α

Деталь	α
Радиальный износ в подшипниках качения	1,5
Износ зубьев шестерен	1,5
Радиальный износ подшипников скольжения	0,5...0,7
Накладки тормозов, дисков муфт сцепления	1

В большинстве случаев величина износа в период приработки меньше допуска на изготовление. В связи с этим, принимая за начальный нижний предельный размер детали можно пренебречь b_u . Тогда величина износа в период приработки приближенно равна:

$$u(t) \approx a_u \cdot t^\alpha = u_{np}. \quad (5.26)$$

При предельном износе $t = t_p$. Тогда величина износа в период приработки позволяет нам найти ресурс детали:

$$t_p = \sqrt[\alpha]{u_{np} / a_u}. \quad (5.27)$$

Для определения вероятности безотказной работы по условию изнашивания необходимо знать плотность распределения ресурса детали $f(t_p)$ (рис. 5.12).

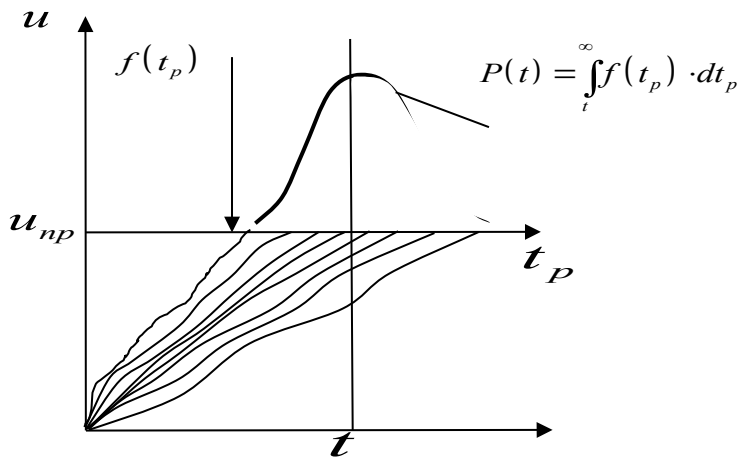


Рис. 5.12 – Формирование плотности распределения ресурса детали по износу

Полагая, что ресурс t_p распределяется по нормальному закону, получим:

$$f(t_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{t_p}} \cdot e^{-\frac{t_p - \bar{t}_p}{2\sigma_{t_p}^2}}. \quad (5.28)$$

Характеристики \bar{t}_p и σ_{t_p} определяют по статистическим данным, полученным в результате наблюдения за рассматриваемыми деталями в эксплуатационных условиях.

Для практических расчетов долговечности деталей, подвергающихся изнашиванию от трения, используют следующую зависимость:

$$\sigma_k^m \cdot S = const \quad \text{или} \quad q^m \cdot N = const, \quad (5.29)$$

где σ_k – контактные напряжения; S – путь трения; q – удельное давление; N – число циклов трения; m – показатель степени

(от 1 до 3), меньше при сухом трении, больше, при работе со смазкой.

Вычисление ресурса T детали с определенной вероятностью проводится по зависимости:

$$T = M(t) + u_p \cdot \sigma_t, \quad (5.30)$$

где $M(t)$ и σ_t – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение времени T безотказной работы; u_p – квантиль нормального распределения для заданной вероятности P .

Для ресурса, выраженного через число циклов трения, получим:

$$N_p = M(N) + u_p \cdot \sigma_N. \quad (5.31)$$

Преобразуем это выражение, проведя следующие операции:

- запишем выражение для медианного значения $N(P=0,5)$ – т.е. математическое ожидание $N = M(N)$;
- разделим искомое выражение на данное:

$$\frac{N_p}{N} = 1 + u_p \frac{\sigma_N}{M(N)} = 1 + u_p \cdot v_N,$$

где v_N – коэффициент вариации.

– решим уравнение относительно N_p :

$$N_p = N(1 + u_p \cdot v_N)$$

– заменим N из выражения:

$$q^m \cdot N = q_0^m \cdot N_0 \rightarrow N = \left(\frac{q_0}{q} \right)^m \cdot N_0,$$

таким образом:

$$N_p = N_0 \left(\frac{q_0}{q} \right)^m \cdot (1 + u_p \cdot v_N), \quad (5.32)$$

где q_0 и N_0 – среднее удельное давление и число циклов трения;
 N_p – ресурс детали, т.е. число циклов трения при удельном давлении q , которое выдержит деталь до установленного износа с вероятностью P .

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

6. ИСПЫТАНИЯ МАШИН НА НАДЕЖНОСТЬ

6.1 Виды и методы испытания машин на надежность

Испытания машин классифицируют по следующим признакам:

- **по целям:** контрольные испытания, исследовательские (аттестационные, граничные, определительные);
- **по срокам проведения:** ускоренные, неускоренные;
- **по методам проведения:** разрушающие, неразрушающие;
- **по этапу:** на этапе производства, эксплуатационные [32–36].

Контрольные испытания проводят для контроля качества продукции. Они подразделяются на:

– **предварительные испытания** опытных образцов проводят на предприятии-изготовителе для решения о возможности предъявления продукции на государственные испытания;

– **государственные (ГОСТ Р) испытания** опытных образцов проводят для решения вопроса о целесообразности производства и передачи в эксплуатацию изделия индивидуального производства;

– **приемо-сдаточные испытания** проводит изготовитель при приемо-сдаточном контроле;

– **типовые испытания** – контрольные испытания готовой продукции, проводимые до и после внесения изменений в конструкцию или технологию изготовления для проверки эффективности внесенных изменений или сравнения качества продукции, выпущенной в разное время;

– **исследовательские испытания** – проводят для изучения параметров и показателей качества.

6.2 Испытания на надежность

Испытания на надежность проводят с целью определения и проверки количественных показателей надежности, которые были приняты на стадии проектирования. В связи с этим различают **определенные** и **контрольные** испытания [32–36].

Для проведения испытаний разрабатывают программу и методику испытаний.

В программу наблюдений при проведении испытаний входят:
цель;

- режим и длительность испытаний;
- перечень показателей надежности;
- условия и план испытаний.

Предусматривают следующие основные планы проведения наблюдений

$$[N, u, N]; [N, u, T]; [N, u, r]; [N, R, T]; [N, R, r], \quad (6.1)$$

где: N – число объектов, поставленных под наблюдение; вторая составляющая определяет условия: u – отказавшие объекты не заменяют новыми; R – отказавшие объекты заменяют или ремонтируют; третья составляющая: N – доведение до предельного состояния всех объектов; T – определяется установленная наработка

или продолжительность испытаний; R – число отказов до возникновения которых ведутся наблюдения.

Пример:

$[N, R, T]$ – под наблюдение поставлено N объектов до времени T , отказавшие объекты заменяют новыми или ремонтируют.

Данные испытаний сводят в таблицы, которые зависят от вида испытываемых машин. Например, данные испытаний станков приведены в табл. 6.1.

На основе анализа и обработки данных таблицы делаются выводы о распределении отказов в процентах и о времени, затраченном на восстановление по узлам и системам.

Таблица 6.1 – Данные испытаний станков

Моде-ль стан-ка	Количество наработанного времени, ч	Число отказов			Суммарное число отказов за t_i	Кол-во часов на ремонт		
		Эл. оборуд.	Гидр. оборуд.	Мех. оборуд.		Эл. оборуд.	Гидр. оборуд.	Мех. оборуд.
	$\sum t_i$	$\sum Z_e$	$\sum Z_g$	$\sum Z_m$	$\sum Z$	$\sum T_e$	$\sum T_g$	$\sum T_m$

После проведения испытаний на надежность машина полностью разбирается, замеряются фактические размеры, определяется износ, дается оценка деталей и узлов по износу.

6.2.1 Испытания серийных машин на надежность

Цель испытаний серийных машин на надежность – провести контроль показателей надежности, указанных в паспортах или технических условиях сборочных единиц, деталей или машины в целом [32-36].

Контрольные испытания для приборов и средств автоматики проводят на интенсивность отказов путем контроля вероятности безотказной работы:

$$P_{\min} = e^{-\lambda_{\max} t}, \quad (6.2)$$

где P_{\min} – нижнее значение вероятности безотказной работы;
 λ_{\max} – верхнее значение интенсивности отказов, указанное в технической документации; t – время, на которое задают показатели надежности.

Если при контрольных испытаниях выявлено несоответствие стандартам или техническим условиям, то разрешается продолжить испытания с увеличением числа объектов.

6.2.2 Ресурсные испытания машин

Цель ресурсных испытаний машин – определить ресурс машины, сборочной единицы, детали до капитального ремонта или на полный срок службы [32–36].

Наиболее точные результаты дают испытания машин в условиях эксплуатации. Но для определения долговечности требуется слишком длительное время испытаний от начала испытаний. Поэтому для определения ресурса, наряду с *эксплуатационными* испытаниями, применяют *ускоренные* испытания (где за счет создания форсированных режимов, нагрузок, ускоряют получение результата).

Большое значение в системе экспериментальной оценки надежности имеют испытания машин и их элементов на специальных стендах. Преимущество стендовых испытаний заключается в максимальном приближении к эксплуатационным условиям работы, в то же время исключаются трудности, связанные с организацией и проведением эксплуатационных испытаний.

6.2.3 Испытания машин после ремонта

Цель испытаний машин после ремонта – проверка правильности сборки агрегатов, соответствие регулировки эксплуатационным требованиям, определения качества выполненного ремонта.

Последовательность таких испытаний:

- внешний осмотр и проверка комплектации;
- обкатка в холостом режиме;
- увеличение нагрузки вплоть до эксплуатационной.

Продолжительность обкатки составляет 8...70 ч и зависит от типа машины. Время обкатки на холостом ходу и при 10% загрузке составляет 20–30% общей продолжительности; при 30–50% от

номинальной на – 70–50%. В остальное время проводится обкатка с нарастающей нагрузкой вплоть до максимальной.

При выявлении дефектов испытания могут быть прерваны и проведена частичная разборка для осмотра и проверки качества ремонта с дополнительными последующими испытаниями.

6.2.4 Ускоренные испытания

Сокращение времени на проведение испытаний на надежность является проблемой, имеющей первостепенное значение с точки зрения экономии средств, идущих на испытания и сокращения сроков освоения новых образцов. Ускоренные испытания могут проводиться в различных режимах нагружения.

При проведении нефорсированных ускоренных испытаний воспроизводятся полностью эксплуатационные нагрузки, действующие в механизмах, как по величине, так и по частоте приложения.

Однако следует иметь в виду, что этот метод ускорения испытаний можно использовать только после тщательного анализа влияния непрерывной работы на отдельные элементы и машину в целом.

Коэффициент ускорения можно определить

$$K_y = \frac{t_{np}}{t_{cc}}, \quad (6.3)$$

где t_{np} – время непрерывной работы; t_{cc} – время холодного хода.

Иллюстрация, позволяющая наглядно оценить величину сокращения испытаний во времени представлена на рисунке 6.1.

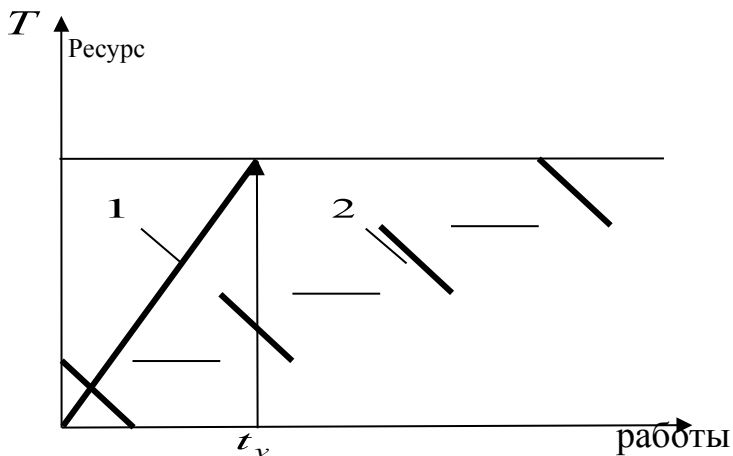


Рис. 6.1 – Диаграмма уплотнения испытаний во времени:
1 – ускоренного, 2 – в обычных условиях

Сокращение сроков испытаний осуществляется за счет максимального использования календарного времени.

Продолжительность испытаний сокращается за счет воспроизведения только наиболее тяжелых режимов работы или даже перегрузок.

Эти испытания делятся на:

- **многофакторные** – когда сокращение испытаний достигается за счет многих учащенных и увеличенных нагрузок;
- **однофакторные** – сокращение испытаний за счет ускорения одной из нагрузок.

Переход от условных циклов и нагрузок при ускоренных испытаниях к реальным условиям эксплуатации проводится путем определения эквивалентного времени работы машины.

Конечная формула для определения величины календарного времени работы в эксплуатационных условиях будет:

$$T_{\kappa} = \frac{t_u \cdot n_u \cdot ПВ_u \%}{3600 \cdot k_z \cdot k_6 \sum \left(t_i \cdot \left(\frac{Q_{\phi_i}}{Q_n} \right)^3 \right) \cdot ПВ\%}, \quad (6.4)$$

где: t_u – длительность цикла испытаний; n_u – число циклов испытаний; $ПВ_u\%$, $ПВ\%$ – относительная продолжительность включения или работы механизма в цикле при испытаниях и в реальных условиях; k_g – коэффициент годового использования; k_v – коэффициент использования во времени машины; t_i – доля времени, в которой действует фактическая нагрузка; Q_{ϕ} , Q_n – фактическая нагрузка и номинальная.

7. НАДЕЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Необходимым, хотя и недостаточным условием надежности машины является надежность ее деталей. В качестве примера можно рассмотреть трансмиссию автомобиля, содержащую значительное число деталей машин общего назначения.

Так полигонные испытания 190 грузовых машин привели к следующему распределению поврежденных трансмиссии по видам деталей машин в %:

- зубчатые колеса – 9,3;
- подшипники качения – 10,5;
- валы и оси – 4,0;
- манжеты и др. резинотехнические соединения – 19,5;
- муфты – 28;
- корпусные детали – 6,2.

Важное место в обеспечении надежности системы занимает подбор металла, из которого конструируют силовые узлы металлоконструкций, так как от несущих конструкций зависит надежность и долговечность изделия [1, 7, 10, 20, 30–36].

7.1 Надежность зубчатых передач

Основные виды отказов зубчатых колес:

- поломка зуба;
- разрушение активных поверхностей.

Обеспечение изгибной выносливости определяется формулой:

$$\sigma_F \leq [\sigma_F] \text{ или } n > [n], \quad (7.1)$$

где σ_F и $[\sigma_F]$ – соответственно рабочее и допускаемое напряжение изгиба в опасной точке; n и $[n]$ – соответственно,

действительный и требуемый (нормативный) запас прочности (рис. 7.1).

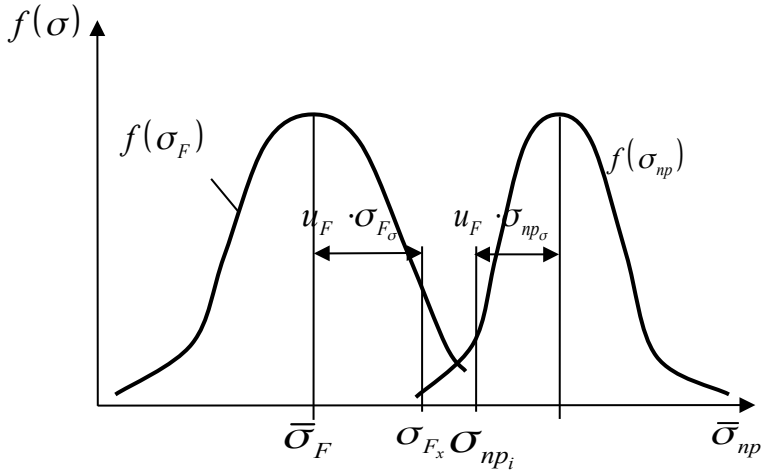


Рис. 7.1 – Формирование вероятности неразрушения от напряжений изгиба

Суть расчета состоит в том, чтобы выбором правой части этих неравенств обеспечить желаемую или нормативную вероятность неразрушения от напряжений изгиба (рис. 7.1).

При анализе отказа можно считать, что ломается тот зуб, который является наименее прочным по сравнению с остальными и в то же время – наиболее нагруженным.

Если σ_{F_x} – напряжения в опасной точке наиболее нагруженного зуба, а σ_{np_i} – минимальное значение предельного напряжения (мера стойкости), то вероятность неразрушения вообще будет равна:

$$P = P(\sigma_{np_i} > \sigma_{F_x}) > 0. \quad (7.2)$$

Если законы распределения обоих напряжений нормальные со средними квадратическими отклонениями σ_{F_σ} и σ_{np_σ} соответственно, то выражение для наибольшего рабочего напряжения будет следующим:

$$\sigma_{F_x} = \bar{\sigma}_F + u_F \cdot \sigma_{F_\sigma} \quad (7.3)$$

Выражение для наименьшего предельного напряжения имеет вид:

$$\sigma_{np_i} = \bar{\sigma}_{np} - u_{np} \cdot \sigma_{np_o}. \quad (7.4)$$

Введем средний запас прочности $\bar{n} = \bar{\sigma}_{np} / \bar{\sigma}_F$, который характеризует понятие в детерминированной постановке.

В вероятностной постановке выражение для определения среднего запаса прочности имеет вид:

$$n = \frac{\sigma_{np_i}}{\sigma_{F_x}} = \frac{\bar{\sigma}_{np} - u_{np} \cdot \sigma_{np_o}}{\sigma_F + u_F \cdot \sigma_{F_o}} = \bar{n} \cdot \frac{1 - u_{np} \cdot v_{np}}{1 + u_F \cdot v_F}, \quad (7.5)$$

где v_{np} , v_F – коэффициенты вариаций прочности и нагружений.

Условием неразрушения зуба будет $n \geq 1$, откуда наименьшее значение среднего запаса прочности определится следующим выражением:

$$\bar{n}_{\min} = \frac{1 + u_F \cdot v_F}{1 - u_{np} \cdot v_{np}}. \quad (7.6)$$

Условие неразрушения тогда можно представить следующей зависимостью:

$$\bar{n} > \bar{n}_{\min}. \quad (7.7)$$

Рассмотрим пример.

Момент, передаваемый колесом, меняется случайным образом так, что $v_F = 0,3$, коэффициент вариации предела выносливости $v_{np} = 0,1$.

Необходимо найти вероятность неразрушения зуба, задавшись условием:

$$P_F(\sigma_F < \sigma_{F_x}) = 0,99;$$

$$P_{np}(\sigma_{np} < \sigma_{np_i}) = 0,99.$$

Решение.

Вероятность неразрушения колес (зуба) при данных условиях будет равна:

$$P = P_F \cdot P_{np} = 0,99^2 = 0,98.$$

Найдем соответствующий этому коэффициент запаса прочности, для чего по таблице находим квантили, соответствующие вероятностям: $u_{np} = u_F = 2,326$.

Тогда

$$\bar{n}_{\min} = \frac{1 + 2,326 \cdot 0,3}{1 - 2,326 \cdot 0,1} = 2,21.$$

Из этого примера можно заключить:

1. Вероятностный расчет дает более определенный результат. В данном примере оказалось, что если $\bar{n} \geq 2,21$, то будет обеспечена вероятность неразрушения не менее, чем 0,98.

2. Сравнительно малый запас прочности (в данном случае 2,21) обеспечивает достаточно высокую надежность.

Так если $P = 0,999$ ($u_i = 3,719$) то:

$$\bar{n}_{\min} = \frac{1 + 3,719 \cdot 0,3}{1 - 3,719 \cdot 0,1} = 3,37,$$

т.е. вероятностный расчет позволяет *не допускать ненужного перерасхода металла*. Например, если годовой выпуск зубчатых колес для редуктора составляет 25 тыс. штук, то нет смысла стремиться к тому, чтобы вероятность разрушения колеса составляла не более 2 штук на 10 тыс. колес?

3. Эффективным средством увеличения надежности колес является уменьшение рассеивания нагружения и параметров прочности.

Если, например, за счет предохранительного устройства ограничить передаваемый момент, то уменьшится и минимально необходимый запас прочности.

В нашем примере, если u_F уменьшится с 0,3 до 0,15, то получим:

$$n_{\min} = \frac{1 + 2,326 \cdot 0,15}{1 - 2,326 \cdot 0,1} = 1,76.$$

В зависимости от внешних воздействующих факторов и условий нагружения подбирают соответствующие материалы с определенными характеристиками.

7.2 Надежность подшипников качения

При нормальной работе подшипникового узла главной угрозой работоспособности подшипника является усталостное выкрашивание, поэтому основным является расчет на долговечность при действии переменных контактных напряжений.

Расчет подшипников на долговечность сводится к обеспечению условия:

$$c < [c], \quad (7.8)$$

где c – требуемая динамическая грузоподъемность, а $[c]$ – нормированная грузоподъемность, указанная в каталогах.

Трудность состоит в том, что ресурс долговечности подшипника является случайной величиной и имеет значительное рассеивание, поскольку зависит от ряда параметров подшипника: размеров деталей, материалов и их свойств, точности изготовления и др. Проиллюстрируем сказанное на примере. Примем, что при наработке $T < T_{\min}$ все подшипники работоспособны, а при $T \geq T_{\max}$ – все подшипники отказывают. Испытания показывают, что в среднем $T_{\max} : T_{\min} = 160$ для шариковых подшипников, и 80 – для роликовых.

Поскольку число отказов необходимо свести к минимуму, за допустимый принимают ресурс T_{90} , соответствующий условию, что не менее 90 % подшипников сохраняют работоспособность (рис. 7.2).

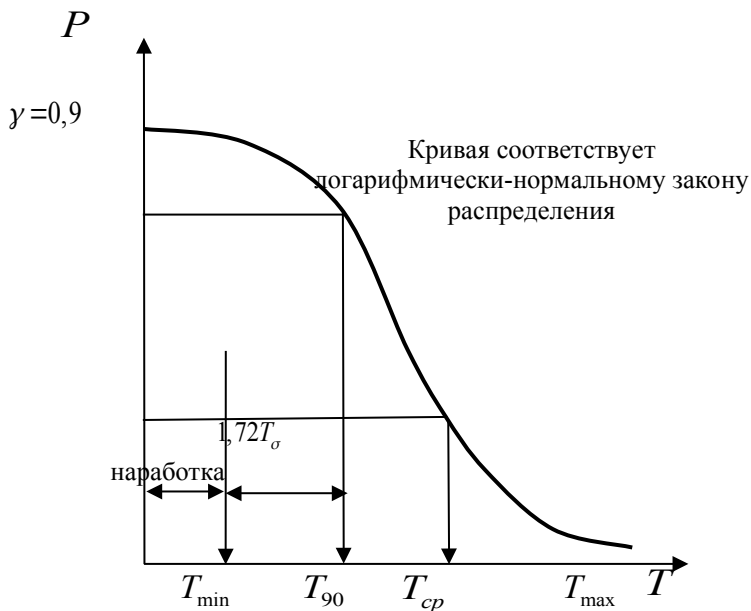


Рис. 7.2 – Формирование ресурса T_{90} подшипников

Допустимый ресурс рассчитывается по формуле:

$$T_{90} = T_{\min} + 1,72 \cdot \sigma_T, \quad (7.9)$$

где σ_T – среднее квадратическое отклонение; а наработке $1,72 \cdot \sigma_T$ соответствует вероятность безотказной работы $P=90\%$.

Это позволяет прекращать эксплуатацию подшипников задолго до выхода большинства из них в предельное состояние отказа. При этом резко уменьшается число отказов, обеспечивается высокая надежность работы подшипников.

8. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ РИСКА

Все процессы жизнедеятельности могут быть представлены как процессы функционирования системы: *человек – машина – среда* (ЧМС) (рис. 8.1).

Предпосылки негативного события:

- ошибки (вольно или невольно);
- отказ техники (неотъемлемое свойство);
- неблагоприятное внешнее воздействие на людей или технику.

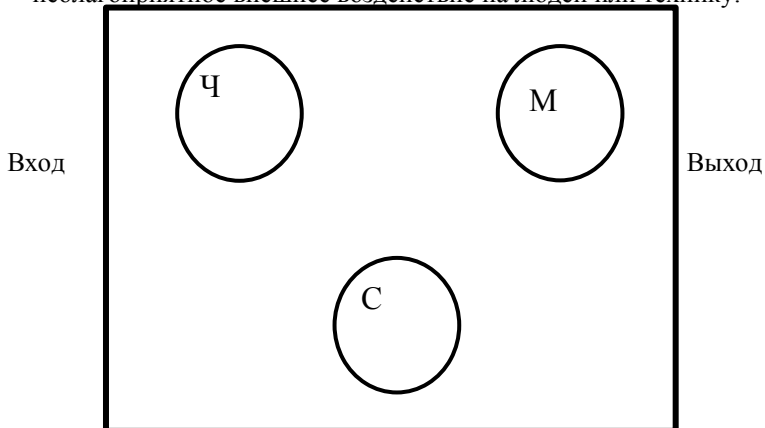


Рис. 8.1 – Система «Человек – Машина – Среда»

На практике все предпосылки действуют в совокупности (рис. 8.2).

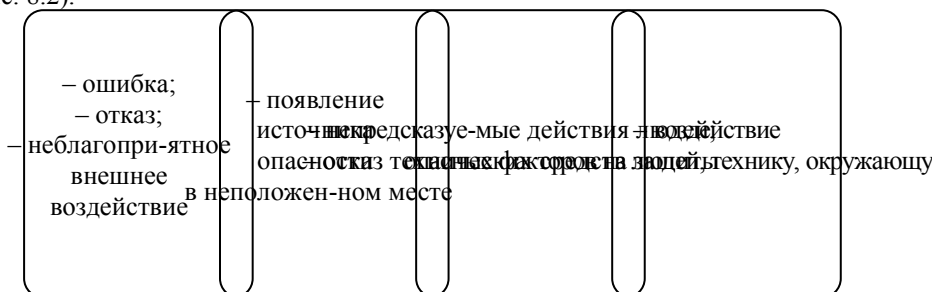


Рис. 8.2 – Предпосылки и формирование негативного события

Значительное место в жизни занимают различные события, называемые несчастными случаями, наносящие вред личности и имуществу.

События такого рода являются непредвиденными, в силу чего их относят на счет случая, судьбы, рока, несчастья, случайного бедствия и т.п. Этот негативный пассивный подход, преобладающий в прошлом, до сих пор отчасти оправдан в отношении сил природы; но постепенно формируется более активный позитивный подход, особенно к опасностям, проистекающим от человеческой деятельности. Сейчас признают, что несчастные случаи в большинстве своем предсказуемы, а потому могут быть предотвращены с помощью соответствующих мер безопасности.

Но полная безопасность не может быть гарантирована никому, независимо от образа жизни. Следовательно, любая деятельность потенциально опасна. Количественно оценивают опасность понятием – «риск» [38].

8.1 Определение риска

Значение слова «*риск*» может быть выражено следующим образом – это вероятность человеческих жертв, травм, заболеваний или материальных потерь. Величина риска определяется по соотношению:

$$R = \frac{n}{N}, \quad (8.1)$$

где n – число неблагоприятных последствий, например смертельных исходов; N – возможное, максимальное число неблагоприятных последствий за определенный отрезок времени.

Различают индивидуальный и социальный риск. Индивидуальный риск характеризует опасность определенного вида для отдельного человека. Так, значения индивидуального риска летального исхода, обусловленного различными причинами, по данным, относящимся ко всему населению США приведены в таблице 8.1.

Социальный риск – это зависимость между частотой событий и числом пострадавших при этом людей.

Значение индивидуального риска используется для количественной оценки потенциальной опасности конкретного рабочего места, вида деятельности, рабочей зоны и т.п. [3, 18, 38].

Таблица 8.1 – Значения индивидуального риска летального исхода

Причина	Риск, R , 1/год
Автомобильный транспорт	$3 \cdot 10^{-4}$
Падение	$9 \cdot 10^{-5}$
Пожар и ожог	$4 \cdot 10^{-5}$
Утопление	$3 \cdot 10^{-5}$
Отравление	$2 \cdot 10^{-5}$
Водный транспорт	$9 \cdot 10^{-6}$
Воздушный транспорт	$9 \cdot 10^{-6}$
Железная дорога	$4 \cdot 10^{-6}$
Падающие предметы	$6 \cdot 10^{-6}$
Молния	$5 \cdot 10^{-7}$
Ураган	$4 \cdot 10^{-7}$

Значение социального риска же используют для интегральной количественной оценки опасных производственных объектов, характеристики масштаба воздействия аварии.

8.2 Приемлемый риск

Как было указано выше, требование абсолютной безопасности нереально. Поэтому конечной целью всех мероприятий по обеспечению безопасности является существенное уменьшение причиняемого вреда, для чего необходимо определить приемлемую степень безопасности и, соответственно, риска [1, 3, 7, 10, 18, 20].

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экономические, социальные и политические аспекты и представляет некоторый компромисс между уровнем безопасности и возможностями ее достижения. Экономические возможности повышения безопасности технических систем безграничны. Увеличивая затраты на повышение безопасности, мы снижаем технический риск, но в то же время растет риск социальный, поскольку при этом уменьшаются затраты на медицину, обучение, органы правопорядка, социальную помощь и т.д.

На рис. 8.3 показан упрощенный пример, иллюстрирующий принцип определения приемлемого риска.

Рис. 8.3 – Определение приемлемого риска: R_m – техногенный риск; R_c – социальный риск; R_Σ – суммарный риск

Кривая суммарного риска имеет минимальное значение, которое позволяет определить оптимальное, на данном этапе развития, сочетание риска и затрат.

В некоторых странах, например в Голландии, приемлемые риски установлены в законодательном порядке. Максимально приемлемым уровнем индивидуального риска гибели человека обычно считается 10^{-6} в год. Пренебрежимо малым считается индивидуальный риск гибели равный 10^{-8} в год. Максимально приемлемым риском для экосистем считается тот, при котором может пострадать 5% видов биогеоценоза.

8.3 Техногенный риск

Техногенный риск – комплексный показатель надежности элементов техносферы [3, 10]. Он выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации

технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, определяется по формуле:

$$R_T = \frac{\Delta T(t)}{T(f)} \quad (8.2)$$

где R_T – техногенный 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 техногенного риска: низкий уровень научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; опытное производство новой техники; серийный выпуск небезопасной техники; нарушение правил безопасной эксплуатации технических систем.

Наиболее распространенные факторы техногенного 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 [1, 19, 27, 37].

8.4 Экономические методы управления риском

Введение понятия «риск» открывает принципиально новые возможности повышения безопасности. К традиционным техническим, организационным и административным методам добавляются экономические методы управления риском.

В основе экономического управления риском лежит методика сравнения затрат и получаемых выгод от снижения риска.

Размер возможного ущерба и риск взаимосвязаны, но связь не поддается математическому выражению, поскольку ни одна математическая модель не способна учесть общий риск и другие обстоятельства, сопутствующие несчастному случаю. При этом можно выдвигать лишь весьма упрощенные гипотезы, неизбежно игнорирующие целый ряд факторов и обстоятельств, которые способны оказывать существенное влияние на окончательный исход. Поэтому в общих случаях риск оценивается на основании анализа причиненного ущерба, а иногда, наоборот, возможный ущерб рассматривают на основании конкретного риска.

Средства, выделяемые для снижения риска, можно расходовать по трем направлениям:

- совершенствование технических средств;
- подготовка персонала;
- ограничение и ликвидация чрезвычайных ситуаций, выплаты компенсаций.

Для правильного определения соотношения инвестиций по каждому направлению необходим специальный анализ с использованием конкретных данных.

Числовые значения вероятности определенных последствий, при количественном анализе, берутся обычно из существующих статистических данных.

8.5 Расчет риска

Методы количественного анализа риска, как правило, характеризуются расчетом нескольких показателей риска и могут включать один или несколько вышеупомянутых методов (или использовать их результаты). Рассмотрим методы расчета риска на конкретных примерах.

8.5.1 Определение величины риска сокращения продолжительности жизни от воздействия радиоактивного загрязнения

Радиоактивное загрязнение местности отрицательно влияет на здоровье проживающих в ней людей. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) на основе изучения обширных научных данных допускает, что при получении человеком сверх нормального уровня дозы облучения в 0,01 Зв сокращение

продолжительности его жизни может составить 5 суток из 25000, которые в среднем живет человек. Доза обусловлена внешним и внутренним облучением.

Сокращение продолжительности жизни при равной степени загрязнения территории радионуклидами определяется в такой последовательности.

Первоначально рассчитывается доза облучения за всю жизнь после образования загрязнения по формуле, рекомендуемой научной службой ООН:

$$D = 2,7 \cdot 10^{-7} K \cdot \Pi, \quad (8.3)$$

где Π – плотность загрязнения местности радионуклидами, Бк/м², K – коэффициент, величина которого зависит от типа почв, преобладающих в регионе проживания. Тип почвы определяет интенсивность миграции радионуклидов в растительные и мясомолочные продукты питания, например, для песчаных почв $K = 0,8$, для черноземных $K = 0,2$.

Затем определяется сокращение продолжительности жизни (СПЖ), в сутках, связанное с дозой облучения, по формуле:

$$СПЖ = 500 \cdot D \quad (8.4)$$

Величина риска потерь дней за жизнь человека определяется зависимостью:

$$R = 4 \cdot 10^{-5} \cdot СПЖ. \quad (8.5)$$

Выборка R^{-1} – в данном случае указывает количество дней, из которых один день теряется.

Пример. Определить величину риска сокращения продолжительности жизни при плотности загрязнения $\Pi = 1,85 \cdot 10^6$ Бк/м² и коэффициенте типа почвы $K = 0,6$

Решение. Рассчитаем в обусловленной последовательности, величину риска:

$$D = 2,7 \cdot 10^{-7} \cdot 0,6 \cdot 1,85 \cdot 10^6 = 0,3 \text{ Зв.};$$

$$СПЖ = 500 \cdot 0,3 = 150 \text{ суток};$$

$$R = 4 \cdot 10^{-5} \cdot 150 = 6 \cdot 10^{-3};$$

$$R^{-1} = \frac{1}{6 \cdot 10^{-3}} = 167 \text{ суток.}$$

Пример. Определить величину риска сокращения продолжительности жизни от ежедневного курения 10 сигарет, если установлено, что выкуривание 1 сигареты в день соответствует ущербу от хронического облучения $D = 0,25$ Зв за жизнь.

Решение. Общая доза облучения от 10 сигарет

$$D = 10 \cdot 0,25 = 2,5 \text{ Зв.}$$

Дальнейший расчет приводит к следующему результату

$$СПЖ = 500 \cdot 2,5 = 1250 \text{ суток;}$$

$$R = 4 \cdot 10^{-5} \cdot 1250 = 5 \cdot 10^{-2};$$

$$R^{-1} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-2}} = 20 \text{ суток.}$$

Иными словами, курение приводит к потере 1 дня из 20 на протяжении жизни в 25000 дней.

8.5.2 Определение величины риска заболевания профессиональной вибрационной болезнью

В результате воздействия производственной вибрации на человека возникают нервно-сосудистые расстройства, поражение костно-суставной и других систем человека.

Патологические отклонения в организме, вызываемые вибрацией, называют вибрационной болезнью. Она имеет две основные формы: периферийную – возникающую от воздействия локальной вибрации; церебральную – от воздействия общей вибрации.

Вибрационная болезнь занимает ведущее место в структуре профессиональных заболеваний для таких профессий, как шахтеры, формовщики, обрубщики литья, слесари механосборочных работ, клепальщики, операторы кузнечно-прессового оборудования и др., и зачастую приводит к инвалидности работников и требует в дальнейшем значительных затрат на содержание и лечение пострадавших [1, 7, 10, 20].

Для определения величины риска заболевания вибрационной болезнью проводились длительные регулярные исследования в условиях производства.

Так, на протяжении 25 лет наблюдалась группа рабочих в 40 человек. Каждый из них в течение 4-х часов работал с одним и тем же типом инструмента, передающим локальную вибрацию на руки. При этом инструменты имели уровень виброускорения L_W в диапазоне от 120 до 160 дБ. Была поставлена задача – определить, через какое время проявятся симптомы васкулярных нарушений в организме человека, указывающие на начало развития вибрационной болезни, в зависимости от величины уровня виброускорения, генерируемого инструментом.

Эти нарушения во времени фиксировались при проявлении их у 10% численности рабочих, далее в последовательности – 20, 30, 40 и 50%. Это позволяет интерпретировать вероятность заболевания групп рабочих, при заданном виброускорении, как равную 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5. Результат наблюдения представлен в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Время воздействия вибрации до появления васкулярных нарушений, год

Уровень виброускорения, L_W , дБ	Число работающих, у которых проявились васкулярные нарушения, %				
	10	20	30	40	50
120	32,5	48,5	59,9	69,7	78,7
125	15,4	23,0	28,4	33,2	37,5
135	5,8	8,6	10,7	12,4	14,1
140	2,7	4,1	5,1	5,9	6,7
145	1,3	2,0	2,4	2,8	3,2
155	0,5	0,7	0,9	1,1	1,2
160	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

Полученные данные дают возможность определить величину риска заболевания вибрационной болезнью через соотношение:

$$R = \frac{Q(t)}{t}, \quad (8.6)$$

где $Q(t)$ – вероятность заболевания; t – время воздействия вибрации, по истечении которого появляются признаки вибрационной болезни, лет.

На основании анализа значений таблицы 8.2 риск заболевания от действия локальной вибрации можно аппроксимировать формулой:

$$R = 10^{(0,05 \cdot L_w - 8)} \cdot \sqrt{Q(t)}. \quad (8.7)$$

Риск заболевания от действия общей вибрации оценивается по формуле:

$$R = 10^{(0,05 \cdot L_w - 8,9)} \cdot \sqrt{Q(t)}. \quad (8.8)$$

Пример. Определить риск и время заболевания работников бригады из 10 человек, использующих ручной инструмент с уровнем виброускорения $L_w = 126$ дБ.

Решение. Расчет риска ведем по формуле для определения риска заболевания от локальной вибрации, а время заболевания определяем по формуле

$$t = \frac{Q(t)}{R}. \quad (8.9)$$

Результаты расчета представлены в графическом виде на рис. 8.4.

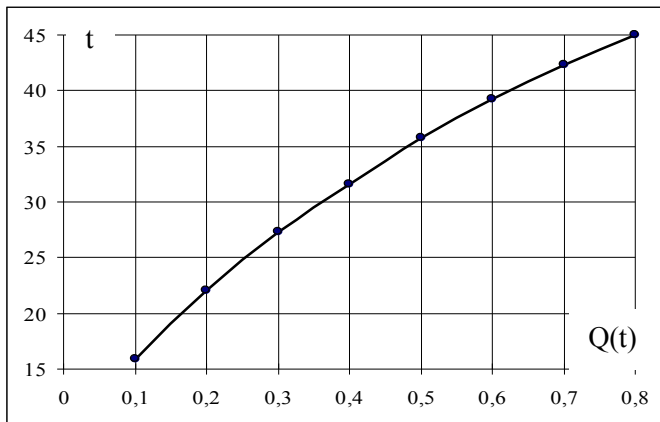


Рис. 8.4 – Результаты расчета риска заболевания от локальной вибрации

Из рис (8.4) видно, что риск заболевания одного из рабочих бригады составляет $R = 6,3 \cdot 10^{-3}$ за 15,9 лет. За весь период профессиональной деятельности $t = 45$ лет заболеет 8 человек.

**Перечень вопросов для подготовки к экзамену по дисциплине
«Надежность технических систем и техногенный риск»**

Теоретическая часть

1. Определение опасности. Таксономия опасностей.
2. Источники опасности. Идентификация опасностей.
3. Показатели безопасности технических систем.
4. Определение чрезвычайной ситуации.
5. Типы деления чрезвычайных ситуаций по причинам возникновения.
6. Причины техногенных чрезвычайных ситуаций.
7. Причины природных чрезвычайных ситуаций.
8. Причины биолого-социальных чрезвычайных ситуаций.
9. Основные типы катастроф по масштабам.
10. Критерии классификации чрезвычайных ситуаций по тяжести последствий.
11. Развитие риска на промышленных объектах.
12. Концепции обеспечения безопасности в зависимости от области применения и уровня принятия решения.
13. Области деления возможных рисков деятельности уровнями приемлемого и пренебрежительного риска.
14. Проводимые мероприятия в области приемлемого риска.
15. Государственная стратегия в области снижения природных и техногенных рисков.
16. Система управление рисками чрезвычайных ситуаций.
17. Виды мониторинга.
18. Мониторинг чрезвычайных ситуаций.
19. Задачи мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций.
20. Силы и средства наблюдения и контроля в рамках РСЧС.
21. Основы теории риска.
22. Анализ риска.
23. Нормативные значения риска.
24. Снижение опасности риска.
25. Аварийная подготовленность персонала.
26. Аварийное реагирование.
27. Допустимый риск.
28. Элементы системы анализа техногенного риска.
29. Проектная авария.
30. Запроектная авария.
31. Классификация внешних возмущающих воздействий.

32. Регламентированные воздействия.
33. Виды воздействий.
34. Методы прогнозирования возникновения чрезвычайных ситуаций.
35. Методы прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций.
36. Виды отказов и причинные связи.
37. Теоретические законы распределения отказов.
38. Виды резервирования.
39. Характеристики дерева отказов.
40. Характеристики дерева событий.
41. Характеристики дерева решений.
42. Организация и проведение экспертизы технических систем.
43. Организационно-экономические механизмы снижения рисков чрезвычайных ситуаций.
44. Рациональное размещение производительных сил и поселений с точки зрения их природной и техногенной безопасности.
45. Подготовка объектов экономики и жизнеобеспечения населения к устойчивому функционированию в чрезвычайных ситуациях.
46. Декларирование промышленной безопасности.
47. Лицензирование видов деятельности в области техногенной безопасности.
48. Государственный контроль и надзор в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций.

Практическая часть

1. Расчет безопасности систем с последовательным соединением элементов.
2. Расчет безопасности систем с параллельным соединением элементов.
3. Способы преобразования сложных структур.
4. Расчет безопасности резервированной системы.
5. Построение и расчет логико-вероятностных моделей причинно-следственных связей отказов технических систем.
6. Логический анализ опасностей.
7. Разработка таблиц состояний и аварийных сочетаний.
8. Прогнозирование риска наступления уязвимого состояния объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание учебно-методического пособия соответствует государственному образовательному стандарту высшего образования Луганской Народной Республики для бакалавров по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» и учебному плану дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск».

Представленный в учебно-методическом пособии материал свидетельствует, что высокопроизводительная и надёжная работа технических систем 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 учебно-методическом 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. Материал, изложенный в учебно-методическом пособии, является составной частью таких учебных курсов как, «Управление техносферной безопасностью», «Технологическое оборудование и его безопасная эксплуатация», «Производственная безопасность» и предусмотрен для изучения учебным планом дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск».

С целью ограничения объема пособия материалы ряда глав даны в сокращенном виде. С другой стороны, более подробно рассматриваются отдельные вопросы, например, основы теории вероятности. Автор рекомендует более пристальное внимание уделить вопросам, связанным с управлением рисками: цели и основные этапы анализа риска и методы анализа риска, особенно анализ деревьев событий и неисправностей, как наиболее информативные и трудоемкие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александровская Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: учебник / Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А. Лисов. – М.: Логос, 2003. – 208 с.
2. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание: математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
3. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере / П.Г. Белов. – М.: Академия, 2003. – 512 с.
4. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности / П.Г. Белов. – Киев: КМУ ГА, 1997. – 426 с.
5. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.
7. Ветошкин А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск / А.Г. Ветошкин. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 67 с.
8. Ветошкин А.Г. Техногенный риск и безопасность / А.Г. Ветошкин, К.Р. Таранцева. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. – 58 с.
9. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Госстандарт СССР, 1992. – 68 с.
10. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 37 с.
11. ГОСТ Р 22.0.02-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 16 с.
12. ГОСТ Р 22.0.03-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 12 с.
13. ГОСТ Р 22.0.05-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 16 с.
14. ГОСТ Р 27.310-95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

15. ГОСТ Р 51901.13—2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартиформ, 2005. – 16 с.

16. ГОСТ Р 51901-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

17. Государственный образовательный стандарт высшего образования Луганской Народной Республики по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» (уровень бакалавриата), утвержден приказом Министерства образования и науки Луганской Народной Республики от 21 августа 2018 года № 782-од.

18. Декларирование промышленной безопасности опасных производственных объектов: сб. док. / Госгортехнадзор России. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2002. – 261 с.

19. Дружинин А.М. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480с.

20. Комаревич Л.В. Введение в теорию надежности сложных технических систем: учеб. пособие / Л.В. Комаревич. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1995. – 80 с.

21. Лайтине Х. Пособие по наблюдению условий труда на рабочем месте в промышленности. Система Элмери [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nacot.ru/files/x2.doc>.

22. Ллойд Д. Надежность: Организация исследований, методы, математический аппарат: [пер. с англ.] / Д. Ллойд. – М.: Сов. радио, 1980. – 686 с.

23. Машков А.К. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие / А.К. Машков, В.С. Сердюк, Л.О. Штриплинг. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. – 72 с.

24. Надежность в машиностроении: справ. / под ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.

25. Надежность технических систем и техногенный риск: метод. указания к самостоят. работе студентов / сост.: В.С. Сердюк, А.Б. Корчагин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 89 с.

26. Надежность технических систем: справ. / Ю.К. Беляев [и др.]; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

27. Основные направления оценки рисков рабочей среды: [пер. с лат.] / сост.: В. Кальскис, И. Кристиньш, Ж. Роя. – Рига: SIA «Jelgavas tipografija», 2005. – 72 с.

28. Острейковский В.А. Теория надежности: учебник для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
29. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов / Госгортехнадзор России. – М.: ПИО ОБТ, 2002. – 35 с.
30. Решетов Д.Н. Надежность машин: учебное пособие для машиностроит. спец. вузов / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М.: Высш. школа, 1988. – 231 с.
31. Сердюк В.С. Надежность технических систем и техногенный риск: конспект лекций / В.С. Сердюк, А.Б. Корчагин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 86 с.
32. Синотов А.Г. Планирование испытаний на надежность: учеб. пособие / А.Г. Синотов. – М.: АСМС, 2001. – 124 с.
33. Справочник по надежности / П.К. Горохов, Б.Е. Бердичевский; под ред. Б.Е. Бердичевского. – М.: Мир, 1970. – Т. 2. – 304 с.
34. Справочник по надежности / Ф.С. Соловейчик, Б.Е. Бердичевский. – М.: Мир, 1970. – Т. 3. – 376 с.
35. Справочник по надежности / Ю.Г. Епишин, Б.А. Смиренин, Б.Р. Левин; под ред. Б.Р. Левина. – М.: Мир, 1969. – Т. 1. – 339 с.
36. Труханов В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 1995. – 303 с.
37. Хенли Э.Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э.Дж. Хенли, Х. Кумамото; пер. с англ. В.С. Сыромятникова, Г.С. Деминой; под общ. ред. В.С. Сыромятникова. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
38. Чернова Г.В. Практика управления рисками на уровне предприятия: учеб. пособие / Г.В. Чернова. – СПб.: Питер, 2000. – 172 с.

ГЛОССАРИЙ

Аварийная защита – система устройств, срабатывающих при достижении одним из контролируемых параметров опасного значения.

Аварийная ситуация – это ситуация возникновения аварии и возможного дальнейшего ее развития.

Аварийная ситуация с объектом – это сочетание условий и обстоятельств, создающих аварийные воздействия на объекты.

Аварийно-спасательная служба – совокупность органов управления, сил и средств, предназначенных для решения задач по предупреждению и ликвидации аварий, объединенных в единую систему, основу которой составляют аварийно-спасательные формирования.

Аварийно-спасательные работы – действия по спасению людей, материальных и культурных ценностей, защите природной среды в зоне чрезвычайной ситуации и подавлению или доведению до минимально возможных уровней воздействий характерных для негативных факторов.

Аварийное воздействие на объект – это нерегламентированное воздействие, которое создается в результате попадания объекта в аварийную ситуацию и может привести его к аварии.

Авария – опасное происшествие в технической системе, на промышленном объекте или на транспорте, создающее угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению производственных помещений, сооружений, серьезному повреждению или уничтожению оборудования, механизмов, транспортных средств, сырья и готовой продукции, к нарушению производственного процесса и нанесению ущерба окружающей природной среде.

Авария запроектная – авария, связанная с нарушением нормальной эксплуатации потенциально опасного объекта, которая вызвана не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями (отказом систем контроля, ошибками персонала, внешними воздействиями), которые могут привести к тяжелым последствиям.

Авария проектная – авария, для которой проектом определены исходные события и конечные состояния и предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие, с учетом принципа единичного отказа систем безопасности или с учетом одной, независимо от исходного события ошибки персонала, ограничение ее последствий установленными для таких аварий пределами.

Аварийная ситуация – состояние технической системы, объекта, характеризующееся нарушением пределов и (или) условий безопасной эксплуатации и не перешедших в аварию.

Анализ риска – процесс выявления (идентификации) и оценки опасностей для отдельных лиц, групп населения, объектов, окружающей природной среды и других объектов рассмотрения.

Безопасность – состояние деятельности, при которой с определенной вероятностью исключено проявление опасностей.

Воздействие – 1) любые потоки вещества, энергии и информации, непосредственно образующиеся в окружающей среде или возникающие в результате антропогенной деятельности; 2) применительно к техническим объектам – это действие, направленное на какой – либо объект и определяющее его переход от одного состояния к другому, изменяющее его качество в том или ином направлении.

Декларация безопасности опасного производственного объекта – это документ, в котором представлены результаты всесторонней оценки возможности аварии и связанной с ней угрозы для персонала и населения прилегающих территорий; анализ достаточности принятых мер по предупреждению аварий и по обеспечению готовности организации к эксплуатации опасного производственного объекта в соответствии с требованиями норм и правил промышленной безопасности, а также к локализации и ликвидации последствий аварии на объекте.

Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) – государственная организационно–правовая структура, объединяющая органы управления, силы и средства федеральных органов исполнительной власти субъектов РФ, органов местного самоуправления и организаций. В полномочия РСЧС входит решение вопросов защиты населения и территорий от ЧС.

Идентификация опасности – процесс распознавания образа опасности, установление возможных причин, пространственных и временных координат, вероятности проявления, величины и последствий опасности.

Источник чрезвычайной ситуации – опасное природное явление или опасное техногенное происшествие, широко распространенная инфекционная болезнь людей, сельскохозяйственных животных и растений, применение современных средств поражения, в результате чего произошла или может возникнуть ЧС.

Комиссия по чрезвычайным ситуациям – функциональная структура органа исполнительной власти субъекта РФ и органа местного самоуправления, а также органа управления объектом экономики, осуществляющая в пределах своей компетенции руководство соответствующей подсистемой или звеном РСЧС либо проведением всех видов работ по предотвращению возникновения ЧС и их ликвидации. Выделяют следующие виды комиссий по ЧС: территориальные, ведомственные и объектовые.

Лицензия – это разрешение, которое выдается регулирующими органами на основе оценки безопасности и сопровождается специальными предписаниями и условиями, которые должны быть выполнены юридическим лицом, получившим лицензию.

Мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций – совокупность мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения ЧС, а также на сохранение жизни и здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей природной среде и материальных потерь в случае их возникновения.

Мониторинг природно-технических систем – система стационарных наблюдений за состоянием природной среды и сооружений в процессе их строительства, эксплуатации и ликвидации и выработка рекомендаций по нормализации экологической обстановки и инженерной защите сооружений.

Надежность – свойство объекта выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования. Надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать ряд свойств (в отдельности или в определенном сочетании), основными из которых являются следующие: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, устойчивость, режимная управляемость и живучесть.

Опасный производственный (промышленный) объект – объект, производство, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют пожаровзрывоопасные и (или) опасные химические вещества, создающие реальную угрозу возникновения аварии.

Опасность – негативное свойство системы «человек – среда обитания», способные причинить ущерб и обусловленное энергетическим состоянием среды и действиями человека; ситуация (в природе или техносфере), в которой возможно возникновение явлений

или процессов, способных поражать людей, наносить материальный ущерб, разрушительно действовать на окружающую человека среду.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности состояния оборудования, объекта.

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

Ошибка персонала – единичное неправильное действие при управлении техническими системами или единичный пропуск правильного действия, важных для безопасности.

Превентивные меры защиты от ЧС – это предпринимаемые заблаговременно по прогнозу времени и места возникновения опасных природных, техногенных и социальных явлений, а при отсутствии такой информации – на основе прогноза их частоты (или вероятности на заданный интервал времени) на определенной территории, меры по смягчению негативных последствий ЧС.

Принцип резервирования или дублирования – принцип, состоящий в одновременном применении нескольких устройств, способов, приемов, направленных на защиту от одной и той же опасности. Предусмотренные устройства срабатывают последовательно.

Риск, или степень риска - это сочетание частоты (или вероятности) и последствий определенного опасного события. Понятие риска всегда включает в себя два элемента: частоту, с которой осуществляется опасное событие, и последствия этого события; реализация опасностей определенного класса. Риск может быть определен как частота (размерность – обратное время) или вероятность возникновения одного события при наступлении другого события (безразмерная величина, лежащая в пределах от 0 до 1).

Риск возникновения чрезвычайной ситуации (риск ЧС) – вероятность или частота возникновения ЧС.

Риск индивидуальный – вероятность реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций для одного человека или социальной группы.

Риск приемлемый – риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из экономических и социальных соображений. Риск эксплуатации промышленного объекта является приемлемым, если его величина настолько незначительна, что ради выгоды, получаемой от эксплуатации объекта, общество готово пойти на этот риск.

Приемлемый риск гибели человека обычно считается 10^{-6} в год. Пренебрежительно малым признается риск гибели человека: 10^{-8} в год.

Риск социальный – характеризует масштабы и тяжесть негативных последствий чрезвычайных ситуаций, а также различного рода явлений в обществе, социально – политических преобразований, снижающих качество жизни людей. По существу – это риск для группы или сообщества людей.

Риск технический – комплексный показатель надежности элементов техносферы, который выражает вероятность возникновения аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений.

Риск экологический – вероятность возникновения экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного, техногенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия.

Риск экономический – вероятность экономических потерь в будущем; соотношение пользы и вреда, получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности.

Управление риском – часть системного подхода к принятию решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности промышленных аварий для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба материальным ценностям и окружающей природной среде.

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – нарушение нормальной жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, массовыми заболеваниями животных и растений, а также применением противником современных средств поражения и приведшие или могущие привести к людским и материальным потерям.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

**КАРПОВ Владислав Викторович,
КОВАЛЕНКО Александр Владимирович**

Надёжность технических систем и техногенный риск

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 14.01.2020. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman
Печать ризографическая. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 8,60.
Тираж 100 экз. Заказ № 2.

Издатель
ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет
имени Тараса Шевченко»
«Книга»

ул. Оборонная, 2 г. Луганск, ЛНР, 91011. Т/ф: (0642) 58-03-20
e-mail: knitaizd@mail.ru