

Федеральное агентство по образованию РФ  
Ангарская государственная техническая академия

Прусакова А.В.

Надежность технических систем и  
техногенный риск  
часть I  
Учебное пособие

Ангарск - 2008

УДК 66.192(075)

ББК

Рецензент:

Надежность технических систем и техногенный риск. Учебное пособие. Часть I / Прусакова А.В. - Ангарск, 2008. - с.

Рассматриваются основные вопросы теории надежности и оценки техногенного риска. В пособии изложены основные понятия надежности и риска. Приведены показатели надежности, безотказности, долговечности, ремонтнопригодности и сохраняемости, основные теории расчета надежности технических систем. Даются основные методы расчета надежности и оценки риска, управления риском. Приведена классификация и определение рисков (индивидуальный, коллективный, потенциальный, территориальный, социальный) и их количественные показатели.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Безопасность технологических процессов и производств», «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» и может быть использовано при подготовке специалистов в области технологий обеспечения безопасности продукции, производства, объектов.

## ВВЕДЕНИЕ

Общество на современном этапе все чаще сталкивается с проблемами обеспечения безопасности и защиты человека и окружающей среды. Безопасность и устойчивость развития общества - два взаимосвязанных понятия, имеющих определяющее значение при выборе ориентиров и путей достижения высокого материального и духовного уровней жизни людей.

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

В Законе Российской Федерации “О безопасности”, принятом 25 марта 1992г, “под безопасностью Российской Федерации понимается качественное состояние общества и государства, при котором обеспечивается защита каждого человека, проживающего на территории Российской Федерации, его прав и гражданских свобод, а также надежность существования и устойчивость развития Республики, защита ее ценностей, материальных и духовных источников жизнедеятельности, конституционного строя и государственного суверенитета, независимости и территориальной целостности от внутренних и внешних врагов”.

Существовавшая до недавнего времени концепция безопасности на основе принципа «нулевого риска» практически показала неадекватность законам техносферы. Эти законы имеют вероятностный характер и возможность аварий и катастроф всегда существует.

Высокий рост аварийности в ряде отраслей промышленности - угольной, горнорудной, химической, нефтегазовой и металлургической отраслям промышленности, транспорту и другим говорит об актуальности проблемы. Проблема предупреждения происшествий приобретает особую актуальность в атомной энергетике, химической промышленности, при эксплуатации военной техники, где

используется и обращается мощные источники энергии, высокотоксичные и агрессивные вещества.

В настоящее время в России ситуации проблема техногенной опасности приобретает особое значение для промышленных районов, где сосредоточен огромный потенциал производств (которых насчитывается около 30 тыс.) в сочетании со значительным износом основного оборудования и сложной социально-экономической обстановкой.

Основными причинами крупных техногенных аварий являются:

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

Государственная политика в области экологической и промышленной безопасности и концепция «приемлемого риска», лежащая в основе обеспечения безопасности и безаварийности производственных процессов на объектах экономики в настоящее время, предусматривают в Федеральных законах: «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 1.11.1994 г., «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 №116-ФЗ, "О радиационной безопасности населения" от 09.01.96 г. №3-ФЗ, О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.99 г. №52-ФЗ, "Об использовании атомной энергии" от 21.11.95 г. №170-ФЗ, "Об охране окружающей среды" от 10.01.02 г. №7-ФЗ, организационно-правовые нормы в области защиты граждан РФ, а также

окружающей природной среды от чрезвычайных ситуаций различного происхождения и дают возможность объективной оценки опасностей и позволяют наметить пути, средства и мероприятия борьбы с ними.

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

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

Обеспечение безопасности населения и окружающей природной среды представляет собой весьма сложную техническую задачу, решение которой невозможно без совершенствования и углубления инженерной подготовки в области исследования надежности, прогнозирования и обеспечения безопасности технических систем.

В соответствии с современной практикой риск-анализ как процесс идентификации опасности и анализа риска для отдельного человека или группы населения, имущества или окружающей среды выполняется на основе теории надежности и безотказности технических систем с привлечением методов теории вероятностей, математической статистики и современных вычислительных средств.

Идентификация фактического состояния сложных технических систем, обнаружение предотказного состояния, прогнозирование остаточного ресурса обеспечивают безотказное функционирование техники и предотвращают ущерб окружающей среде, возникающий при аварийных, нестандартных ситуациях.

В учебном пособии рассматриваются современные положения теории надежности и теории риска, современная нормативно-правовая база и практические расчеты.

## Глава 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ

1.1. История развития теории надежности. Стандартизация в области надежности.

1.2. Основные термины и понятия надежности

1.3 Состояние объекта

1.4 Дефекты, повреждения, отказы

1.5 Временные понятия надежности

1.6 Техническое обслуживание и ремонт

### 1.1. История развития теории надежности. Стандартизация в области надежности.

Научно-техническое направление «надежность» прошло в своем развитии ряд этапов. В начале XX века для обеспечения надежности технических систем использовали «запасы» прочности, увеличивая габариты и массу изделия. Стремление уменьшить габариты изделий стимулировало изучение реальных нагрузок на изделие в эксплуатации. Развитие теории вероятности и математической статистики позволило уже в 30-х годах установить статистическую природу коэффициентов запаса прочности и сформулировать понятие «отказа» как превышение нагрузки над прочностью. Развитие электрификации в нашей стране дало развитие идеи «резервирования» при параллельном использовании генераторов и трансформаторов в процессе создания энергосистем, обеспечивающих бесперебойное снабжение электроэнергией всех отраслей народного хозяйства.

Теория надежности - сравнительно молодая научно-техническая дисциплина, формирование которой в современном виде относится к 50-м годам XX столетия и развитие теории надежности наблюдалось благодаря достижениям в области электроники и автоматики, авиации и ракетно-космической техники. В развитии теории надежности можно выделить три этапа:

- 50-е годы - становление направления;

- 60-е годы - этап классической теории надежности;
- с 70-х годов по настоящее время - этап системных методов обеспечения надежности.

Начало широкой публикации научных работ, относящихся к области исследований надежности относятся к промышленно развитым странам. В нашей стране такие работы (это касается открытой печати, доступной широкому кругу научно-технических работников) имели единичные издания. Это следовало из концепции “абсолютной безопасности” отечественных технологий и оборудования.

Первые шаги в области исследований надежности были связаны со сбором статистических данных о надежности радиоэлементов, а все усилия специалистов были направлены на определение причин ненадежности. В 50-е годы в США начинает создаваться система безопасности авиационно-космической техники. Например, в 1950 г. Военно-воздушные силы США организовали группу для изучения проблем надежности радиоэлектронного оборудования и разработки мер по повышению и сокращению эксплуатационных затрат. В 1952 г. Министерство обороны США образовало консультативную группу по надежности из представителей правительственных организаций и промышленности. В 1957 г. эта группа опубликовала доклад со своими рекомендациями, которые затем были включены в военные стандарты на электронное оборудование и системы. Было установлено, что основной причиной отказов радиоэлектронной аппаратуры являлась низкая надежность ее элементов. Перед разработчиками возникли вопросы: каковы основные причины ненадежности элементов и имеются ли пути их устранения? Существуют ли способы создания надежных систем из ненадежных элементов и можно ли прогнозировать надежность проектируемой системы? Ответ на эти вопросы потребовал изучения влияния на отказы эксплуатационных факторов - температуры, сре-



ды, вибрации, электрической нагрузки. Был собран большой статистический материал для оценки надежности элементов и зависимости ее от нагрузок.

Следующими шагами стали: развитие физической надежности (физики отказов) и развитие математических основ теории надежности, явившихся обязательным атрибутом разработки и проектирования сложных и ответственных технических систем. В этом ракурсе под теорией надежности понимают научную дисциплину, которая изучает закономерности сохранения во времени техническими системами свойства выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов и транспортирования.

В ряде промышленно развитых стран изучение безопасности технических систем, как отдельной независимой деятельности, было введено в практику в шестидесятых годах и центр внимания переместился от анализа поведения отдельных элементов различного типа (электрических, механических, гидравлических) на причины и последствия, вызываемые отказом этих элементов в соответствующей системе. Ряд методов выявления отказов были взяты на вооружение специалистами, работающими в химической и других опасных отраслях промышленности, как раз из сферы военных и аэрокосмических исследований: “Дерево отказов”, “Дерево последствий”, “Метод последовательной экспертизы”, “Экспертные оценки” и др.

Многочисленные испытания на надежность и анализ причин отказов, выполненные в 60-е годы, показали ее зависимость от конструкций изделий, технологии и условий эксплуатации. Было установлено, что причины отказов можно обнаружить и устранить. Например, требования американских стандартов того времени нашли наиболее полное воплощение в программе «APOLLO» по обеспечению надежности космических летательных аппаратов в

процессе разработки, производства и наземной экспериментальной отработки, позволившей выявить многочисленные конструктивные и технологические дефекты, которые привели бы к отказу в полете со 100 %-ной вероятностью. На этом этапе развития теории надежности появились новые вопросы: как на ранних этапах создания систем заложить возможности обеспечения высокой надежности?

Начиная с 1968 г. происходит переход к третьему этапу. Национальным агентством по авиации и космическим исследованиям NASA был опубликован новый вариант требований к надежности, заложивший основу современных систем и программ обеспечения надежности.

Разработанные в области космической техники программы и системы обеспечения надежности в настоящее время применяются при создании различных видов техники. Типовая методика обеспечения надежности закреплена в многочисленной нормативно-технической документации по двум направлениям. Первое из них относится к потенциальной надежности, которая опирается на конструктивные методы (выбор материалов и запаса прочности, уменьшение взаимовлияния элементов конструкции). Второе относится к обеспечению эксплуатационной надежности, которое в свою очередь опирается на методы стабилизации условий эксплуатации (защитные экраны, стабилизация напряжений и пр.) и технического обслуживания (ремонт и профилактика).

В настоящее время в конкретных областях техники продолжают разрабатываться прикладные вопросы надежности, вопросы обеспечения надежности данной конкретной техники (радиоэлектронные приборы, средства вычислительной техники, транспортные машины, продуктопроводы, химические реакторы и т.д.). При этом решается вопрос о наиболее рациональном использовании общей теории надежности в конкретной области техники и ведется

разработка таких новых положений, методов и приемов, которые отражают специфику данного вида техники. Так возникла прикладная теория надежности.

В 1965 г. при **международной электротехнической комиссии (МЭК)** был создан **технический комитет (ТК) «Безопасность и ремонтпригодность»**. С 1976 г. стандартам, разрабатываемым ТК 56, придается большая практическая направленность, отражающая системный подход к решению задач безотказности и ремонтпригодности. В 1986 г. принята концепция «Инструментального ящика», положившая начало разработке систематизированной структуры стандартов МЭК по надежности.

В 1989 г. в соответствии с общими тенденциями развития техники наименование ТК изменяется на «надежность» (Dependability) – ТК «Надежность».

В 1990 г. происходит переориентация деятельности ТК 56 на общетехнические стандарты по надежности, распространяющаяся на все виды техники, попадающих под сферу действия всех технических комитетов МЭК и ИСО (International Standards Organization). Теперь программа ТК 56 не ограничивается стандартами на электротехнику и радиотехнику. В этом же году была организована объединенная группа «Качество, надежность, статистика», координирующая работу ТК 56 с комитетами ИСО: ТК 176 по управлению качеством и ТК 69 по применению статистических методов. В 1993 г. издан первый стандарт под двойным номером МЭК 300-1/ИСО 9000-4, положивший начало гармонизации стандартов МЭК по управлению надежностью (серия 300) и стандартов ИСО по управлению качеством (серия 9000). В 1995 г. официально ТК 56 придан статус комитета, работающего на комитеты МЭК и ИСО.

В России в 1990 г. в рамках Госстандарта РФ был создан технический комитет ТК 119 «Надежность в техни-

ке», который проводит работы по стандартизации надежности в технике и разработке системы стандартов над одноименным названием (стандарты группы 27).

Однако в последние годы характер деятельности ТК 119 сильно изменился в связи с возросшей активностью МЭК/ТК 56 «Надежность» и появилась необходимость свою деятельность направить на соответствие российских стандартов с международными.

В настоящее время техническая политика государственной стандартизации в области надежности с учетом международных и национальных интересов основывается на следующих нормативных документах:

- Законах РФ «О стандартизации», «О защите прав потребителей», «О сертификации»;
- Стандартах Государственной системы стандартизации;
- Правилах по стандартизации ПР 50.1.008-95 «Правила проведения работ по международной стандартизации в РФ»;
- Директивах ИСО/МЭК по технической работе;
- РД 50-688-90 «Типовое положение о техническом комитете по стандартизации»;
- «Положение о техническом комитете по стандартизации ТК 119 «Надежность в технике»;
- Инструкциях «О порядке деятельности экспертов РФ в МЭК/ТК 56 «Надежность».

Основными целями стандартизации в области надежности являются:

- создание нормативной базы для регулирования взаимодействия разработчика, изготовителя, поставщика, потребителя, заказчика при обеспечении надежности на всех стадиях жизненного цикла изделия;

- регламентация методов решения типовых задач надежности как основы для разработки соответствующих норм, правил, процедур, применяемых при создании, испытании и эксплуатации конкретных изделий.

Стандартизация в области надежности носит комплексный характер и увязана со стандартизацией по безопасности, технической диагностики, применению статистических и других методов и рассматривается как составная часть стандартизации управления качеством.

С 1 января 1997 г. в РФ введена в действие система стандартов «Надежность в технике» (ГОСТ 27.001-95), где даны основные понятия надежности и системы стандартов надежности.

Управление надежностью - совокупность организационных и научно-технических мер, направленных на обеспечение, поддержание и повышение надежности объектов, реализуемых на всех стадиях их жизненного цикла.

**Система стандартов "Надежность в технике"** (ССНТ)- совокупность взаимосвязанных основополагающих межгосударственных стандартов, устанавливающих общие для всех видов технических объектов положения, принципы, правила и методы управления их надежностью.

В состав ССНТ входят основополагающие стандарты, распространяющиеся на все или большинство видов технических объектов и устанавливающие общие принципы, правила и методы управления надежностью на всех или отдельных стадиях жизненного цикла объектов. Стандарты ССНТ гармонизированы с международными стандартами МЭК/ТК 56 «Надежность».

ССНТ предназначена для осуществления средствами единой технической политики в области управления надежностью объектов. Стандарты ССНТ служат нормативной базой для регулирования взаимодействия заинтере-

сованных сторон (разработчиков, изготовителей, поставщиков, заказчиков, потребителей) при обеспечении надежности на всех стадиях жизненного цикла объектов, устанавливают организационные, технические, технологические, экономические и др. положения, направленные на обеспечение рационального уровня надежности объектов и регламентируют методы решения типовых задач обеспечения надежности в качестве основы для разработки соответствующих правил и методик, применяемых на стадиях жизненного цикла конкретных объектов.

В структуру системы стандартов «Надежность в технике» входят следующие группы стандартов:

0. Общие вопросы.

1. Организация работ по обеспечению надежности.

2. Способы обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла.

3. Анализ и расчет надежности.

4. Испытания, контроль, оценка надежности.

Состав объектов стандартизации в каждой группе приведен в таблице 1.

Межгосударственные стандарты, входящие в ССНТ, обозначают по единой схеме, имеющей вид:

**ГОСТ 27. X XX - XX**

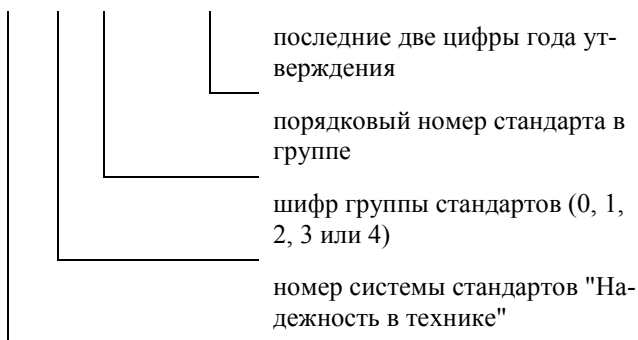


Таблица 1

## Структура системы стандартов

Шифр и наименование группы стандартов ССНТ	Объект стандартизации
0 Общие вопросы	0.1 Основные принципы стандартизации в области надежности 0.2 Основные понятия, термины и определения 0.3 Общие правила и методы установления требований по надежности 0.4 Классификация отказов и предельных состояний
1 Организация работ по обеспечению надежности	1.1 Общий порядок обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла, организационные структуры 1.2 Программы обеспечения надежности, планирование работ 1.3 Управление применением комплектующих изделий (надежностные аспекты) 1.4 Информационное обеспечение надежности 1.5 Экспертиза проектов
2 Способы обеспечения	2.1 Общие требования и рекомендации по конструктивным и технологическим способам обеспечения надежности 2.2 Экспериментальная отработка на надежность, моделирование роста надежности 2.3 Ориентированные на обеспечение надежности способы контроля качества и отбраковка потенциально ненадежных объектов 2.4 Назначение и продление срока службы, срока хранения и ресурса 2.5 Обеспечение (поддержание) надежности в эксплуатации

Шифр и наименование группы стандартов ССНТ	Объект стандартизации
3 Анализ и расчет надежности	3.1 Порядок и общие требования к методам анализа и расчета надежности 3.2 Методы расчета показателей надежности 3.3 Методы расчета надежности с учетом качества программных средств (надежности программного обеспечения) 3.4 Методы расчета надежности с учетом "человеческого фактора" 3.5 Анализ возможных видов, последствий и критичности отказов
4 Испытания, контроль, оценка надежности	4.1 Порядок оценки и контроля надежности 4.2 Правила проведения и общие требования к методам испытаний 4.3 Выбор условий и режимов испытаний 4.4 Предварительная обработка статистических данных о надежности (проверка однородности, сравнение, выявление тренда, проверка вида распределения) 4.5 Оценка показателей надежности по экспериментальным данным 4.6 Планы контрольных испытаний на надежность 4.7 Оценка показателей надежности объектов по данным о надежности их составных частей 4.8 Методы сокращения объемов испытаний форсирование режимов, использование дополнительной информации, контроль и оценка надежности по состоянию технологического процесса и др.



Стандарты по надежности являются обязательным для изделий, требования к которым устанавливают государственные органы и для изделий, численные значения показателей надежности которых заявлены изготовителем или поставщиком в сопроводительной документации на изделие, паспорте или рекламе любого вида. Для других видов изделий обязательный характер требований стандартов по надежности оговаривают в контрактах, договорах на поставку и/или аналогичных документах и носят рекомендательный характер.

В России в настоящее время интенсивно ведутся работы в сфере обеспечения безопасности эксплуатации технических систем, разрабатываются методики, направленные на определение надежности технических систем, оценку риска, совершенствуется нормативно-правовая база.

Так как надежность является составной частью понятия качества продукции, то в общем случае независимым подтверждением стабильного уровня надежности продукции является сертификат на систему качества предприятия, выдаваемый аккредитованной организацией. Требования к системе качества при этом устанавливаются международными стандартами ИСО 9001-9003, а право выдачи сертификата имеют организации (органы по сертификации систем качества), аккредитованные в национальной или международной системе сертификации.

В настоящее время в России такая система сертификации создается в отдельных отраслях промышленности, например, оборонной - система «Оборонсертификация», так и в регионах, например, «Байкал сертификат».

Промышленные предприятия Байкальского региона уже имеют опыт сертификации системы управления качеством на основе МС ИСО 9002-94. В частности, Иркутское авиационно-производственное объединение (ИАПО) полу-

чило сертификат, выданный аккредитованным в системе Оборонсерт уполномоченным органом. Дочернее предприятие Сибирско-Уральской алюминиевой компании ООО «СУАП-ПМ», образованное в 1998 г. из цеха порошковой металлургии Иркутского алюминиевого завода, сертифицировано фирмой National Quality Assurance (NQA, Великобритания), имеющей лицензию от британского правительственного сертификационного центра UCAS на право аккредитации предприятий алюминиевой промышленности, получен сертификат соответствия № 10611. Этот сертификат дает право поставки продукции зарубежным потребителем.

## **1.2. Основные термины и понятия надежности**

Надежность является одной из важнейших характеристик, учитываемых на этапах разработки, проектирования и эксплуатации самых различных технических систем.

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

Наука о надежности является комплексной наукой и развивается в тесном взаимодействии с другими науками, такими как физика, химия, математика и др.

Уровень надежности в значительной степени определяет развитие техники по основным направлениям: автоматизации производства, интенсификации рабочих процессов и транспорта, экономии материалов и энергии.

При изучении вопросов надежности рассматривают самые разнообразные объекты — изделия, сооружения,

системы с их подсистемами, состоящие из множества взаимодействующих механизмов, аппаратов и приборов. Например, автоматизированная линия насчитывает более миллиона деталей: отказ в работе хотя бы одного ответственного элемента такой системы может привести к нарушению работы всей линии.

Недостаточная надежность оборудования приводит к огромным затратам на ремонт простого оборудования, прекращению снабжения населения электроэнергией, водой, газом, транспортными средствами, невыполнению ответственных задач, иногда, авариям, связанным с большими экономическими потерями, разрушениями крупных объектов и человеческими жертвами.

Основные термины и понятия, используемые в теории надежности, регламентированы в соответствии с ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».

Терминология по надежности в технике распространяется на любые технические объекты - изделия, сооружения и системы, а также их подсистемы, рассматриваемые с точки зрения надежности на этапах проектирования, производства, испытании, эксплуатации и ремонта.

В теории надежности рассматриваются понятия: объект, система, элемент, изделие.

**Объект** – техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Объектами могут быть различные системы и их элементы, в частности: сооружения, установки, технические изделия, устройства, машины, аппараты, приборы и их части, агрегаты и отдельные детали.

**Система** – совокупность элементов, объединенных конструкционно или функционально для выполнения некоторых требуемых функций.

Признаком системности является структурированность системы, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели. Системы функционируют в пространстве и времени.

**Элемент** – составная часть технического объекта, рассматриваемая при проведении анализа как единое целое, не подлежащее дальнейшему разукрупнению. Само понятие элемента условно и относительно, так как любой элемент, в свою очередь, всегда можно рассматривать как совокупность других элементов.

Понятия система и элемент относительны: объект, считавшийся системой в одном исследовании, может рассматриваться как элемент, если изучается объект большего масштаба. Деление системы на элементы зависит от характера рассмотрения (функциональные, конструктивные, схемные или оперативные элементы), от требуемой точности проводимого исследования, от уровня наших представлений, от объекта в целом. Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Например, станок, при установлении его собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, деталей и т.п., а при изучении надежности технологической линии – как элемент.

**Изделие** - единица продукции, выпускаемая данным предприятием, цехом и т.д.

Изделия делят на: **невосстанавливаемые**, которые не могут быть восстановлены потребителем и подлежат замене, например, электрические лампы, микросхемы, элементы питания, и т.д.; **восстанавливаемые**, которые могут быть восстановлены потребителем, например, автомобиль, электронная аппаратура, радиоприемник, станок и т.д.

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 под **надежностью** понимают свойство объекта сохранять во времени и установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Например: для электродвигателя - обеспечивать требуемые скорость; для системы электроснабжения - обеспечивать электроприемники энергией требуемого качества. Недостаточная надежность объекта приводит к огромным затратам на его ремонт, простоям машин, прекращению снабжения населения электроэнергией, водой, газом, транспортными средствами, невыполнению ответственных задач, иногда к авариям, связанным с большими экономическими потерями, разрушением крупных объектов и с человеческими жертвами. Чем меньше надежность машин, тем большие партии их приходится изготавливать, что приводит к перерасходу металла, росту производственных мощностей, завышению расходов на ремонт и эксплуатацию.

Надежность - комплексное свойство, состоящее в общем случае из безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости (рисунок 1). Например, для неремонтируемых объектов основным свойством может являться безотказность. Для ремонтируемых объектов одним из важнейших свойств, составляющих понятие надежности, может быть ремонтпригодность.

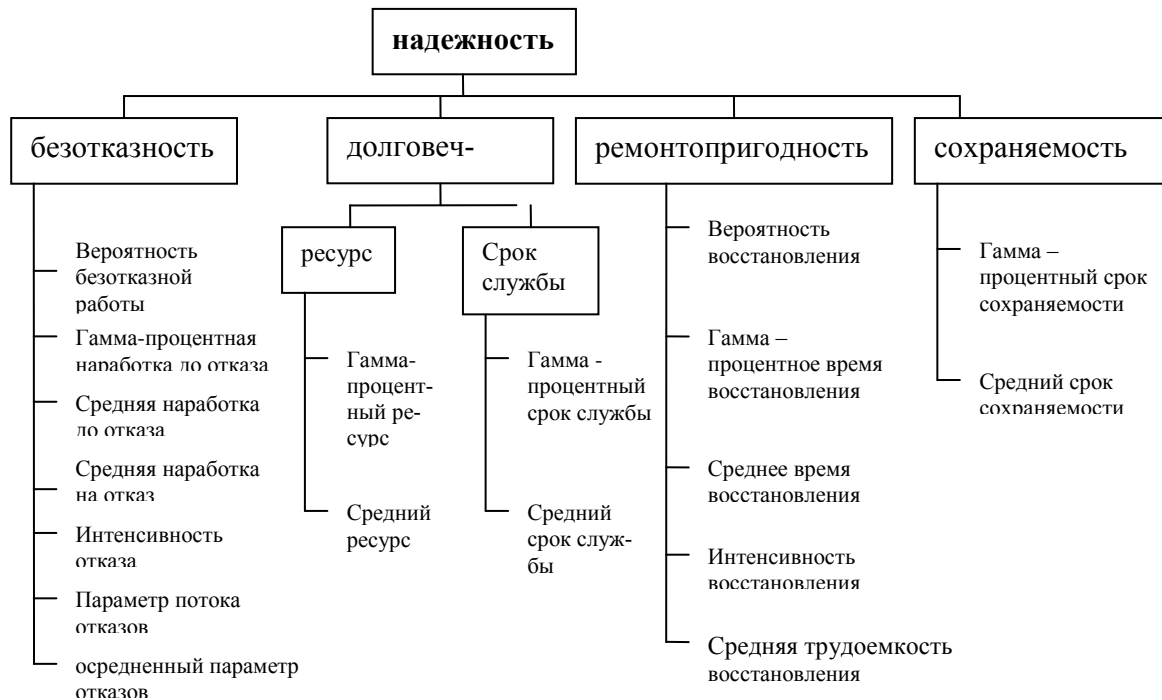


Рисунок 1 Надёжность оборудования

**Безотказность** - свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Безотказность в той или иной системе свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования. Это свойство 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 браком дорогих изделий.

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

Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности и эффективности. Для невосстанавливаемых изделий понятия долговечности и безотказности совпадают.

**Ремонтопригодность** - свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

**Сохраняемость** - свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и/или транспортирования.

Сохраняемость важна для техники сезонного применения (уборочные сельскохозяйственные машины, некоторые коммунальные машины, речные суда замерзающих рек и т.д.), а также машин и оборудования для ликвидации критических ситуаций (противопожарное и спасательное оборудование), имеющие по своему назначению длитель-

ный период нахождения в режиме ожидания работы и другого оборудования.

Так как в процессе хранения и транспортировки объекты подвергаются неблагоприятным воздействиям, например, колебаниям температуры, действию влажности воздуха, вибрации и т.д. в результате после хранения и/или транспортирования объект может оказаться в неработоспособном и даже предельном состоянии.

В зависимости от условий и режимов применения объекта требования сохраняемости ставят по-разному. Для некоторых классов объектов может быть поставлено требование, чтобы после хранения объект находился в таком же состоянии, как и к моменту начала хранения. В этом случае объект будет удовлетворять требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, предъявляемым к объекту к моменту начала хранения. В реальных условиях происходит ухудшение параметров, характеризующих работоспособность объекта, а также снижается его остаточный ресурс. В одних случаях достаточно, чтобы после хранения или транспортирования объект оставался в работоспособном состоянии. В большинстве других случаев требуется, чтобы объект сохранял достаточный запас работоспособности, т.е. обладал безотказностью после хранения или транспортирования.

Различают сохраняемость объекта до ввода в эксплуатацию и в период эксплуатации (при перерывах в работе). Во втором случае срок сохраняемости входит составной частью в срок службы.

В зависимости от особенностей и назначения объектов срок сохраняемости до ввода объекта в эксплуатацию может включать в себя срок сохраняемости в упаковке и (или) законсервированном виде, срок монтажа и (или) срок хранения на другом упакованном и (или) законсервированном более сложном объекте.



Требования к показателям безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости для объекта, подвергнутого длительному хранению, должны указываться в техническом задании и в отдельных случаях могут быть снижены относительно уровня требований на новый объект, не находившийся на хранении.

### **1.3 Состояние объекта**

Объект может находиться в различных технических состояниях: исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном и предельном.

Данные понятия охватывают основные технические состояния объекта. Каждое из них характеризуется совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, а также качественных признаков, для которых не применяют количественные оценки. Номенклатуру этих параметров и признаков, а также пределы допустимых их изменений устанавливают в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

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

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

**Работоспособное состояние (работоспособность)** - состояние объекта, при котором значения всех параметров,

характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации.

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

Понятие исправность шире, чем понятие работоспособность. Работоспособный объект в отличие от исправного удовлетворяет лишь тем требованиям нормативно-технической документации, которые обеспечивают его нормальное функционирование при выполнении поставленных задач. При этом он может не удовлетворять, например, эстетическим требованиям, если ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его нормальному (эффективному) функционированию.

Работоспособность и неработоспособность в общем случае могут быть полными или частичными. Полностью работоспособный объект обеспечивает в определенных условиях максимальную эффективность его применения. Эффективность применения в этих же условиях частично работоспособного объекта меньше максимально возможной, но значения ее показателей при этом еще находятся в пределах, установленных для такого функционирования, которое считается нормальным. Частично неработоспособный объект может функционировать, но уровень эффективности при этом ниже допустимого. Полностью неработоспособный объект применять по назначению невозможно. Понятия частичной работоспособности и частичной неработоспособности применяют главным образом к сложным системам, которые могут находиться в нескольких состояниях с различными уровнями эффективности

функционирования системы. Работоспособность и неработоспособность некоторых объектов могут быть полными, т.е. они могут иметь только два состояния.

Для сложных объектов возможны частично неработоспособные состояния, при которых объект способен выполнять требуемые функции с пониженными показателями или способен выполнять лишь часть требуемых функций.

Для некоторых объектов признаками неработоспособного состояния могут быть отклонения показателей качества изготавливаемой им продукции. Например, для некоторых технологических систем к неработоспособному состоянию может быть отнесено такое, при котором значение хотя бы одного параметра качества изготавливаемой продукции не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) и технологической документации.

Процесс обнаружения и устранения отказа (повреждения) с целью восстановления его работоспособности (исправности) называется восстановлением.

Объекты подразделяются на **восстанавливаемые**, которые могут быть восстановлены потребителем, их отказы связаны с повреждениями одного или немногих элементов, которые могут быть заменены (например, телевизор, автомобиль, трактор, станок и т.д.) и **невосстанавливаемые**, которые не могут быть восстановлены потребителем и подлежат замене (например, электрические лампочки, резисторы, подшипники, полупроводниковые изделия, зубчатые колеса и т.д.).

Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно - **предельное состояние**.

Для восстанавливаемых объектов переход в предельное состояние определяется наступлением момента,

когда дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна вследствие следующих причин:

- становится невозможным поддержание его безопасности, безотказности или эффективности на минимально допустимом уровне;

- в результате изнашивания и (или) старения объект пришел в такое состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает необходимой степени восстановления исправности или ресурса.

Для некоторых восстанавливаемых объектов предельным состоянием считается такое, когда необходимое восстановление исправности может быть осуществлено только с помощью капитального ремонта.

Невосстанавливаемый объект достигает предельного состояния при возникновении отказа или при достижении заранее установленного предельно допустимого значения срока службы или суммарной наработки, устанавливаемых из соображений безопасности эксплуатации в связи с необратимым снижением эффективности использования ниже допустимой или в связи с увеличением интенсивности отказов, закономерным для объектов данного типа после установленного периода эксплуатации.

Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

- при неустранимом нарушении безопасности;
- при неустранимом отклонении величин заданных параметров;
- при недопустимом увеличении эксплуатационных расходов.

Предельное состояние характеризуется **критерием предельного состояния**, под которым понимается признак или совокупность признаков предельного состояния объ-

екта, установленные нормативно-технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией. В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния.

Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации объекта. При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, уничтожен или передан для применения не по назначению. Если критерий предельного состояния установлен из соображений безопасности хранения или транспортирования, то при наступлении предельного состояния хранение или транспортирование должно быть прекращено.

Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух видов. Первый вид совпадает с неработоспособным состоянием. Второй вид обусловлен тем, что возникают обстоятельства, недопустимые в связи с опасностью или вредностью эксплуатации. При этом переход в предельное состояние второго вида происходит до потери объектом работоспособности.

Для ремонтируемых объектов выделяют два или более видов предельных состояний, требуется отправка объекта в средний или капитальный ремонт, т.е. временное прекращение применения объекта по назначению. Третий вид предельного состояния предполагает окончательное прекращение применения объекта по назначению. Критерии предельного состояния каждого вида устанавливаются нормативно-технической, конструкторской или эксплуатационной документацией.

## 1.4 Дефекты, повреждения, отказы

Переход объекта из исправного состояния в неисправное происходит вследствие дефектов, повреждений и отказов.

**Дефект** - нарушение работоспособности из-за ошибок при изготовлении деталей.

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

**Отказ** - событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. При отказе объект полностью или частично перестает выполнять заданные функции. При полной потере работоспособности возникает полный отказ, при частичной – частичный.

Причинами отказов могут быть явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта.

Признаком возникновения отказа является выход значения любого из технических параметров за пределы допусков, а также качественные признаки, указывающие на нарушение нормальной работы объекта.

Отказы характеризуются критериями отказов, под которыми понимаются признаки или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации.

Критерии отказов следует отличать от критериев повреждений. Под критериями повреждений понимают признаки или совокупность признаков неисправного, но работоспособного состояния объекта. Последствиями отказа называются явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.

Совокупность признаков, характеризующих последствия отказа называется **критичностью отказа**. Понятие

критичности отказа введено для того, чтобы проводить классификацию отказов по их последствиям. Подобная классификация содержится в международных, в отраслевых и других нормативно-технических документах. Критерием для классификации могут служить прямые и косвенные потери, связанных с наступлением отказа, затраты труда и времени на устранение последствий отказов, возможность и целесообразность ремонта силами потребителя или необходимость ремонта изготовителем или третьей стороной, продолжительность простоев из-за возникновения отказов, степень снижения производительности при отказе, приводящем к частично неработоспособному состоянию и т.п. Классификация отказов по последствиям устанавливается по согласованию между заказчиком и разработчиком. Она необходима при нормировании надежности и при установлении гарантийных обязательств выхода значений любого из параметров за пределы допусков.

Отказы классифицируются:

- по типу;
- по своей природе;
- по характеру возникновения;
- по причине возникновения;
- по легкости обнаружения;
- по времени возникновения;
- по характеру устранения;
- по дальнейшему использованию объекта;
- по последствиям отказов.

*По типу отказы* подразделяются на:

- **Отказ функционирования** - это отказ, при наступлении которого изделие перестает выполнять свои функции. Дальнейшая эксплуатация возможна только после ремонта.

- **Параметрический отказ** - это отказ, характеризующийся отклонением значения хотя бы одного рабочего

параметра машины за пределы допуска. Продолжение эксплуатации машин, имеющей такой отказ, может привести к выпуску некачественной продукции или снижению эффективности работы машины. Более того, в сложных машинах и системах, параметрические отказы элементов могут привести к отказу функционирования.

По своей *природе* отказы могут быть:

- *случайные*, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п.;

- *систематические*, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п.

Отказы бывают:

-**ресурсный отказ** - отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния;

-**независимый отказ** - отказ, не обусловленный другими отказами;

-**зависимый отказ** - отказ, обусловленный другими отказами.

Рассмотрим подробнее каждый из классификационных признаков:

*По характеру возникновения отказа* различают внезапный, постепенный, сбой, перемежающиеся отказы.

**Внезапный отказ** - это отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта (проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта).

**Постепенный отказ** - это отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта (происходящий в результате медленного постепенного снижения качества объекта).



Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробой изоляции, обрывы и т.п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

В отличие от внезапного отказа наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удается предупредить наступление отказа или принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий. Постепенные отказы – связаны с износом деталей и старением материалов.

Однако четкую границу между внезапными и постепенными отказами провести очень трудно. Механические, физические и химические процессы, которые составляют причины отказов, как правило, протекают во времени достаточно медленно. Так, усталостная трещина в стенке трубопровода или сосуда под давлением, зародившаяся из трещинообразного дефекта, медленно растет в процессе эксплуатации, этот рост может быть прослежен средствами неразрушающего контроля. Однако, собственно отказ (наступление течи) происходит внезапно. Если по каким-либо причинам своевременное обнаружение несквозной трещины оказалось невозможным, то отказ придется признать внезапным.

По мере совершенствования расчетных методов и средств контрольно-измерительной техники, позволяющих своевременно обнаружить источники возможных отказов и прогнозировать их развитие по времени, все большее число отказов будет относиться к категории постепенных.

Кратковременный отказ называется сбоем. **Сбой** - это самоустраниющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

Характерным признаком сбоя является то, что восстановление работоспособности после его возникновения не требует ремонта аппаратуры, например, путем воздействия оператора на органы управления, устранением обрыва нити, магнитной ленты и т.п., коррекцией положения заготовки. Примером сбоя может служить кратковременно действующая помеха при приеме сигнала или остановка ЭВМ, устраняемая повторным пуском программы с места останова или ее перезапуском сначала.

**Перемежающийся отказ** - это многократно возникающий самоустраниющийся отказ одного и того же характера.

*По причинам возникновения* различают:

отказы из-за конструктивных дефектов (конструктивный отказ);

отказы из-за технологических дефектов (производственный отказ);

отказы из-за эксплуатационных дефектов (эксплуатационный отказ);

отказы из-за постепенного старения (износа).

**Конструктивный отказ** - это отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования (вызванные недостатками конструкции). В этом случае наиболее распространенными являются недоучет "пиковых" нагрузок, применение материалов с низкими потребительскими свойствами, схемные "промахи" и др. Отказы этой группы сказываются на всех экземплярах изделия, объекта, системы.

**Производственный отказ** - это отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нару-

шением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии, т.е. отказ, обусловленный нарушением технологии изготовления изделий (например, выход отдельных характеристик за установленные пределы). Отказы этой группы характерны для отдельных партий изделий, при изготовлении которых наблюдались нарушения технологии изготовления.

**Эксплуатационный отказ** - отказ, возникающий по причине, связанной с нарушением установленных правил и условий эксплуатации (вызванные неправильной эксплуатацией). Отказы этой группы характерны для отдельных экземпляров изделий.

**Деградационный отказ** - отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и норм проектирования, изготовления и эксплуатации. Отказы из-за постепенного старения (износа), вследствие накопления необратимых изменений в материалах, приводят к нарушению прочности (механической, электрической), взаимодействия частей объекта.

*По характеру обнаруживаемости* отказы делят:

**-очевидный (явный) отказ** - отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке его применения по назначению;

**-скрытый (неявный) отказ** - это отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

*По времени возникновения* отказа делят на **прирабочные**, возникающие в первый период эксплуатации и связанные с выявлением дефектных элементов, не отбра-

кованных контролем; **при нормальной эксплуатации и износосвые.**

По характеру устранения с течением времени различают устойчивые (окончательные) и самоустраняющиеся (кратковременные) отказы.

По дальнейшему использованию объекта различают: полные отказы, исключающие возможность работы объекта до их устранения и частичные, при которых объект может частично использоваться.

Для целей анализа и исследования надежности причинные схемы отказов представляют в виде статистических моделей, которые вследствие вероятностного возникновения повреждений описываются вероятностными законами.

### **1.5 Временные понятия надежности**

Надежность объектов оценивается временными понятиями, такими как наработка, наработка до отказа, наработка между отказами, время восстановления, ресурс, срок службы и т.д.

**Наработка** - продолжительность или объем работы объекта. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т. п.)

**Наработка до отказа** - наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

**Наработка между отказами** - наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа.

**Время восстановления** - продолжительность восстановления работоспособного состояния.

**Ресурс** - суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

**Срок службы** - календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

**Срок сохраняемости** - календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции.

По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным нормативно-технической документацией на объект.

**Остаточный ресурс** - суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние. Аналогично вводятся понятия остаточной наработки до отказа, остаточного срока службы и остаточного срока хранения.

Перечисленные временные показатели относят к конкретно взятому индивидуальному объекту. Безотказная работа такого объекта зависит от качества сырья, материалов, заготовок и полуфабрикатов, от достигнутого уровня технологии и степени стабильности технологического процесса, от уровня технологической дисциплины, от выполнения всех требований по хранению, транспортированию и применению объекта по назначению. Многие объекты включают в себя комплектующие изделия, детали и элементы, поставленные другими изготовителями. Перечисленные выше факторы, влияя на работоспособность составных частей объекта, определяют его работоспособность в целом.

Опыт эксплуатации показывает, что наработка до отказа, ресурс, срок службы и срок сохраняемости обнаруживают значительный статистический разброс. Этот разброс может служить характеристикой технологической культуры и дисциплины, а также достигнутого уровня технологии. Разброс наработки до первого отказа, ресурса и срока службы может уменьшить, а их значения можно увеличить путем надлежащей и экспериментальной отработки каждого индивидуального объекта до передачи в эксплуатацию. Этот подход осуществляют для особо ответственных объектов. Целесообразность такого подхода для массовых объектов должна каждый раз подтверждаться технико-экономическим анализом.

Наработка до отказа вводится как для неремонтируемых (невосстанавливаемых), так и для ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов.

**Назначенный ресурс** - суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

**Назначенный срок службы** - календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

**Назначенный срок хранения** - календарная продолжительность хранения, при достижении которой хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

Цель установления этих показателей заключается в обеспечении принудительного, заблаговременного прекращения применения объекта по назначению, исходя из требований безопасности или технико-экономических соображений. Для объектов, подлежащих длительному хранению, может быть установлен назначенный срок хране-

ния, по истечении которого дальнейшее хранение недопустимо, например, из требований безопасности.

При достижении назначенного ресурса (назначенного срока службы, назначенного срока хранения), и зависимости от назначения объекта, особенности эксплуатации, технического состояния и других факторов объект может быть списан, направлен в средний или капитальный ремонт, передан для применения не по назначению, переконсервирован (при хранении) или может быть принято решение о продолжении эксплуатации.

Назначенный ресурс может выражаться различными величинами: часами работы (например, для двигателей), количеством выстрелов (для орудий), километрами пробега и т.д.

Назначение ресурса обязательно для авиационной, военной, космической техники. В настоящее время это понятие все шире применяется во всех отраслях промышленности в виде гарантированного ресурса, который изготовитель гарантирует потребителю.

## **1.6 Техническое обслуживание и ремонт**

Техническое обслуживание включает регламентированные в конструкторской (проектной) и (или) эксплуатационной документации операции по поддержанию работоспособного и исправного состояния. В техническое обслуживание входят контроль технического состояния, очистка, смазывание и т. п..

Объекты делятся на **обслуживаемые** (для которых проведение технического обслуживания предусмотрено нормативно-технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией) и **необслуживаемые** (для которых проведение технического обслуживания не предусмотрено нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией).

**Восстановление** - процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния (перевод в прежнее нормальное состояние).

Восстановление включает в себя идентификацию отказа (определение его места и характера), наладку или замену отказавшего элемента, регулирование и контроль технического состояния элементов объекта и заключительную операцию контроля работоспособности объекта в целом.

Перевод объекта из предельного состояния в работоспособное состояние осуществляется при помощи ремонта, при котором происходит восстановление ресурса объекта в целом. В ремонт могут входить разборка, дефектовка, замена или восстановление отдельных блоков, деталей и сборочных единиц, сборка и т. д. Содержание отдельных операций ремонта может совпадать с содержанием операций технического обслуживания.

Объекты могут быть восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми.

**Восстанавливаемый объект** - объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

**Невосстанавливаемый объект** - объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Ремонт – устранение неисправностей. Объекты делятся на: ремонлируемые и неремонлируемые.

**Ремонлируемый объект**- объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической, ре-



монтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

**Неремонтируемый объект** - объект, ремонт которого не возможен или не предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие этапы развития прошло научно-техническое направление «надежность»?
2. Охарактеризуйте международные и российские стандарты в области надежности.
3. Перечислите основные понятия надежности и дайте им определения.
4. Дайте характеристику надежности с позиции основных состояний объекта: исправность, неисправность, работоспособность, неработоспособность. В чем общность и отличия состояний «исправность» и «работоспособность» объекта?
5. Предельное состояние. При каких условиях наступает предельное состояние объекта?
6. Какими могут быть объекты по способности к восстановлению работоспособного состояния?
7. Какими могут быть отказы по типу и природе происхождения и как они классифицируются?
8. Какие показатели относятся к временным понятиям надежности?
9. Что входит в понятия технического обслуживание и ремонт?

## **Глава 2 ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОТКАЗНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И СОХРАНЯЕМОСТИ**

- 2.1 Показатели надежности
- 2.2 Показатели безотказности
- 2.3. Показатели долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости
- 2.4. Комплексные показатели надежности

## 2.1 Показатели надежности

К показателям надежности относят количественные характеристики надежности, которые вводят согласно правилам статистической теории надежности. Область применения этой теории ограничена крупносерийными объектами, которые изготавливают и эксплуатируют в статистически однородных условиях и к совокупности которых применимо статистическое истолкование вероятности. Примером служат массовые изделия машиностроения, электротехнической и радиоэлектронной промышленности.

Количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта, называется **показатель надежности**.

К показателям надежности относят единичный, комплексный, расчетный, экспериментальный и т.д.

**Единичный показатель надежности** - показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта.

**Комплексный показатель надежности** - показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность объекта.

В отличие от единичного показателя надежности комплексный показатель надежности количественно характеризует не менее двух свойств, составляющих надежность, например безотказность и ремонтпригодность. Примером комплексного показателя надежности служит коэффициент готовности  $K_r$ , стационарное значение которого (если оно существует) определяют по формуле

$$K_r = \frac{T}{T + T_B}$$

где  $T$  - средняя наработка на отказ;  $T_B$  - среднее время восстановления.

**Расчетный показатель надежности** - показатель надежности, значения которого определяются расчетным методом.

**Экспериментальный показатель надежности** - показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний.

**Эксплуатационный показатель надежности** - показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации.

**Экстраполированный показатель надежности** - показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполяции на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

Методы статистической теории надежности позволяют установить требования к надежности компонентов и элементов на основании требований к надежности объекта в целом.

Все показатели надежности определены как вероятностные характеристики. Это дает возможность прогнозирования этих показателей на стадии проектирования.

Показатели надежности вводят по отношению к определенным режимам и условиям эксплуатации, установленным в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации

## **2.2 Показатели безотказности**

К показателям безотказности относятся:

- вероятность безотказной работы в течение определенного времени;
- гамма-процентная наработка до отказа;
- средняя наработка до отказа;
- средняя наработка на отказ (наработка на отказ);

- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов;
- осредненный параметр потока отказов

Характеристикой надежности следует называть количественное значение критерия надежности конкретного устройства.

Выбор количественных характеристик надежности зависит от вида объекта.

**Вероятность безотказной работы** - вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  объекта в интервале от 0 до  $t$  включительно определяют как

$$P(t) = P\{\tau > t\}, \quad (1)$$

где  $t$  - время или суммарная наработка объекта,  $\tau$  - возникновение первого отказа.

Здесь  $P\{\times\}$  - вероятность события, заключенного в скобках. Вероятность безотказной работы  $P(t)$  является функцией наработки  $t$ . Обычно эту функцию предполагают непрерывной и дифференцируемой.

Если способность объекта выполнять заданные функции характеризуется одним параметром  $v$ , то вместо (1) имеем формулу

$$P(t) = P\{v_1 < v < v_{**}; 0 \leq t_1 \leq t\}, \quad (2)$$

где  $v^*$  и  $v^{**}$  - предельные по условиям работоспособности значения параметров (эти значения, вообще, могут изменяться во времени).

Аналогично вводят вероятность безотказной работы в более общем случае, когда состояние объекта характеризуется набором параметров с допустимой по условиям работоспособности областью значений этих параметров.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  является функцией наработки  $t$ . Обычно эту функцию предполагают непрерывной и дифференцируемой.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  связана с функцией распределения  $F(t)$  и плотностью распределения  $f(t)$  наработки до отказа:

$$F(t) = 1 - P(t); f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (3)$$

Наряду с понятием "вероятность безотказной работы" часто используют понятие "вероятность отказа", которое определяется следующим образом: это вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени. Вероятность отказа ( $Q(t)$ ) на отрезке от 0 до  $t$  определяют по формуле:

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t). \quad (4)$$

Точечные статистические оценки для вероятности безотказной работы  $\tilde{P}(t)$  от 0 до  $t$  и для функции распределения наработки до отказа  $\tilde{F}(t)$  даются формулами:

$$\tilde{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}; \tilde{F}(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (5)$$

где  $N$  - число объектов, работоспособных в начальный момент времени;  $n(t)$  - число объектов, отказавших на отрезке от 0 до  $t$ .

Для получения достоверных оценок объем выборки  $N$  должен быть достаточно велик.

Определение безотказной работы в соответствии с формулой (1) относится к объектам, которые должны функционировать в течение некоторого конечного отрезка времени. Для объектов одноразового (дискретного) применения вероятность безотказной работы определяют как вероятность того, что при срабатывании объекта отказ не возникает. Аналогично вводят вероятность безотказного включения (например, в рабочий режим из режима ожидания).

**Гамма-процентная наработка до отказа** - наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью  $\gamma$ , выраженное в процентах.

Показатель "Гамма-процентная наработка до отказа" определяют по формуле:

$$F(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \text{ или } P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100} \quad (6)$$

где  $F(t_\gamma)$  - функция распределения наработки до отказа (ресурса, срока службы),

$P(t_\gamma)$ -вероятность безотказной работы.

Как видно из формулы (6), гамма-процентные показатели равны квантилям соответствующих распределений. Если вероятности, отвечающие этим квантилям, выражают в процентах, то для показателей безотказности обычно задают значения 90; 95; 99; 99,5 % и т. д. Тогда вероятность возникновения отказа на отрезке  $[0; t]$  будет составлять 0,10; 0,05; 0,01; 0,005 и т. д. Задаваемые значения  $\gamma$  для критических отказов должны быть весьма близки к 100%, чтобы сделать критические отказы практически невозможными событиями. Для прогнозирования потребности в запасных частях, ремонтных мощностях, а также для расчета пополнения и обновления парков машин, приборов и установок могут потребоваться гамма-процентные показатели при более низких значениях  $\gamma$ , например при  $\gamma = 50\%$ , что приближенно соответствует средним значениям.

Статистические оценки для гамма-процентных показателей могут быть получены на основе статистических оценок либо непосредственно, либо после аппроксимации эмпирических функций подходящими аналитическими распределениями. Необходимо иметь в виду, что экстраполирование эмпирических результатов за пределы продолжительности испытаний (наблюдений) без привлечения дополнительной информации о физической природе отказов может привести к значительным ошибкам.

**Средняя наработка до отказа** - математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

Среднюю наработку до отказа  $T_1$  вычисляют по формуле

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt, \quad \text{или} \quad T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (7)$$

где  $F(t)$ - функция распределения наработки до отказа,  
 $f(t)$  - плотность распределения наработки до отказа,  
 $P(t)$  - вероятность безотказной работы.

Статистическая оценка для средней наработки до отказа дается формулой

$$\tilde{T}_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j \quad (8)$$

где  $N$ - число работоспособных объектов при  $t=0$ ,

$\tau_j$  - наработка до первого отказа каждого из объектов.

Формула (8) соответствует плану испытаний, при котором все объекты испытываются до отказа.

**Средняя наработка на отказ** - отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Этот показатель введен применительно к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Очевидно, что это должны быть несущественные отказы, не приводящие к серьезным последствиям и не требующие значительных затрат на восстановление работоспособного состояния. Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работать и продолжает работать до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособности, и объект вновь работает до отказа и т. д. На

оси времени моменты отказов образуют поток отказов, а моменты восстановлений - поток восстановлений.

Определение средней наработки на отказ  $T$  находят по формуле:

$$T = \frac{t}{M\{r(t)\}}, \quad (9)$$

где  $t$  - суммарная наработка,  $r(t)$  - число отказов, наступивших в течение этой наработки,  $M\{r(t)\}$  - математическое ожидание этого числа. В общем случае средняя наработка на отказ оказывается функцией  $t$ . Для стационарных потоков отказов средняя наработка на отказ от  $t$  не зависит.

Статистическую оценку средней наработки на отказ  $\tilde{T}$  вычисляют по формуле, которая аналогична формуле (9)

$$\tilde{T} = \frac{t}{r(t)} \quad (10)$$

В отличие от формулы (9) здесь  $r(t)$  - число отказов, фактически происшедших за суммарную наработку  $t$ .

Формула (10) допускает обобщение на случай, когда объединяются данные, относящиеся к группе однотипных объектов, которые эксплуатируются в статистически однородных условиях. Если поток отказов - стационарный, то в формуле (10) достаточно заменить  $t$  на сумму наработок всех наблюдаемых объектов и заменить  $r(t)$  на суммарное число отказов этих объектов.

**Интенсивность отказов** - условная плотность вероятности возникновения отказа объекта при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  определяют по формуле



$$\tilde{\lambda} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} \quad (11)$$

Для высоконадежных систем  $P(t) \gg 1$ , так что интенсивность отказов приближенно равна плотности распределения наработки до отказа.

Статистическая оценка для интенсивности отказов  $\tilde{\lambda}$  имеет вид

$$\tilde{\lambda} = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N\Delta t}, \quad (12)$$

где  $N$  - число объектов, работоспособных в начальный момент времени;  $n(t)$  - число объектов, отказавших на отрезке от 0 до  $t$ ,  $\Delta t$ -длительность интервала времени.

**Параметр потока отказов** - отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую наработку к значению этой наработки.

Параметр потока отказов  $\mu(t)$  определяют по формуле:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M \{r(t + \Delta t) - r(t)\}}{\Delta t} \quad (13)$$

где:  $\Delta t$ - малый отрезок наработки;

$r(t)$  - число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки  $t$ . Разность  $r(t + \Delta t) - r(t)$  представляет собой число отказов на отрезке  $\Delta t$ .

Наряду с параметром потока отказов в расчетах и обработке экспериментальных данных часто используют **осредненный параметр потока отказов**. **Осредненный параметр потока отказов** - отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки.

$$\bar{\mu} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M(r(t_2) - r(t_1))}{t_2 - t_1} \quad (14)$$

По сравнению с формулой (12) здесь рассматривается число отказов за конечный отрезок  $[t_1, t_2]$  причем  $t_1 \leq t_2$ . Если поток отказов стационарный, то параметры, определяемые по формуле (13) и (14), от  $t$  не зависят.

Статистическую оценку для параметра потока отказов  $\tilde{\mu}(t)$  определяют по формуле:

$$\tilde{\mu}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r(t_2) - r(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (15)$$

которая по структуре аналогична формуле (14). Для стационарных потоков можно применять формулу:

$$\tilde{\mu}(t) = \frac{1}{\bar{T}} \quad (16)$$

где:  $\bar{T}$  - оценка для средней наработки на отказ.

Все показатели безотказности определены как вероятностные характеристики. Их статистические аналоги определяют методами математической статистики

### 2.3 Показатели долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости

К показателям *долговечности* относятся:

- **Гамма-процентный ресурс** - суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженный в процентах.

- **Средний ресурс** - математическое ожидание ресурса.

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

- **Средний срок службы** - математическое ожидание срока службы.

При использовании показателей долговечности следует указывать начало отсчета и вид действий после наступления предельного состояния (например, гамма-процентный ресурс от второго капитального ремонта до списания). Показатели долговечности, отсчитываемые от ввода объекта в эксплуатацию до окончательного снятия с эксплуатации, называются гамма-процентный полный ресурс (срок службы), средний полный ресурс (срок службы).

К показателям *ремонтпригодности* относятся:

- **Вероятность восстановления** - вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение.

- **Гамма-процентное время восстановления** - время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

- **Среднее время восстановления** - математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа.

- **Интенсивность восстановления** - условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

- **Средняя трудоемкость восстановления** - математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

К показателям *сохраняемости* относятся:

- **Гамма-процентный срок сохраняемости** - срок сохраняемости, достигаемой объектом с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

- **Средний срок сохраняемости** - математическое ожидание срока сохраняемости.

## 2.4 Комплексные показатели надежности

Комплексные показатели надежности представлены на рисунке 2.

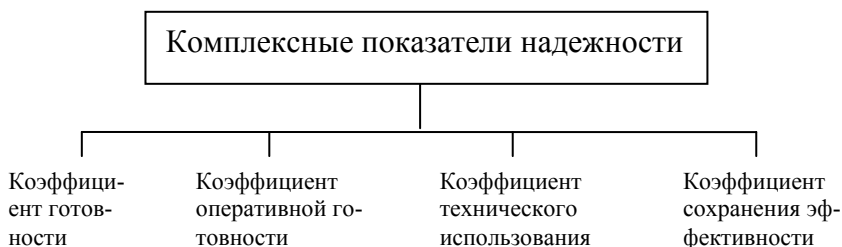


Рисунок 2. Комплексные показатели надежности

**Коэффициент готовности** - вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению по назначению только в отношении его работоспособности в произвольный момент времени.

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

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа в течение заданного интервала времени. Различают стационарный и нестационарный коэффициенты готовности, а также средний коэффициент готовности.

**Коэффициент технического использования** - отклонение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за этот период.

Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации.

**Коэффициент сохранения эффективности** - отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение этого же периода не возникают.

Коэффициент сохранения эффективности характеризует степень влияния отказов на эффективность его применения по назначению. Для каждого конкретного типа объектов содержание понятия эффективности и точный смысл показателя (показателей) эффективности задаются техническим заданием и вводятся в нормативно-техническую и (или) конструкторскую (проектную) документацию.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Перечислите и дайте определения показателям надежности.

2. Назовите показатели безотказности.
3. Охарактеризуйте показатели долговечности.
4. Какими показателями характеризуется показатели ремонтпригодности и сохраняемости?
5. Какие показатели надежности называются комплексными?

## **Глава 3 ОСНОВНЫЕ ТЕОРИИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

1. Теоретические законы распределения отказов.
2. Статистическая обработка результатов испытаний и определение показателей надежности.
3. Основные законы распределения, используемые в теории надежности.
  - 3.1 Биноминальный закон
  - 3.2 Закон Пуассона
  - 3.3 Экспоненциальный закон
  - 3.4 Гамма-распределение
  - 3.5 Распределение Вейбулла
  - 3.6 Нормальное распределение
  - 3.7 Усеченное нормальное распределение
  - 3.8 Логарифмически нормальное (логнормальное) распределение
  - 3.9 Распределение Рэлея
4. О выборе закона распределения отказов при расчете надежности.

Основные вопросы, которые изучает теория надежности - отказы технических элементов (средств, систем); критерии и количественные характеристики надежности; методы анализа и повышения надежности элементов и систем на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации; методы испытания технических средств на надежность; методы оценки эффективности повышения надежности.

Обеспечение надежности является серьезной задачей для специалиста, эксплуатирующего сложные техни-

ческие системы, отказ которых может привести к авариям и чрезвычайным происшествиям. Во-первых, он должен рассмотреть последствия каждого отказа. Неучтенные отказы могут стать впоследствии причиной невыполнения производственной программы. Во-вторых, частые отказы или длительные периоды неисправного состояния могут привести к полной потере работоспособности системы и ее непригодности к последующей эксплуатации. Третий аспект надежности связан с безопасностью для людей и окружающей среды.

Без знания основных вопросов математической теории надежности невозможно реализовать наилучшие условия проектирования технических систем и решить задачи безопасности при эксплуатации.

Рассмотрение вопросов теории надежности ограничивается рассмотрением понятий, законов распределения отказов, способов резервирования, и основных методов расчета надежности систем до первого отказа.

## **1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ**

Отказы в системах возникают под воздействием разнообразных факторов. Поскольку каждый фактор в свою очередь зависит от многих причин, то отказы элементов, входящих в состав системы, относятся, как правило, к случайным событиям, а время работы до возникновения отказов - к случайным величинам. В инженерной практике возможны и не случайные (детерминированные) отказы (отказы, возникновение которых происходит в определенный момент времени, т.е. в момент возникновения причины, так как существует однозначная и определенная связь между причиной отказа и моментом его возникновения). Например, если в цепи аппаратов ошибочно поставлен элемент, не способный работать при пиковой нагрузке, то

всякий раз когда возникает эта нагрузка, он обязательно перейдет в отказовое состояние. Такие отказы выявляются и устраняются в процессе проверки технической документации и испытаний.

При анализе надежности объектом исследования являются случайные события и величины. В качестве теоретических распределений наработки до отказа могут быть использованы любые применяемые в теории вероятностей непрерывные распределения. В принципе можно взять любую кривую, площадь под которой равна единице, и использовать ее в качестве кривой распределения случайной величины. Поэтому прежде чем приступить к инженерным методам расчета надежности и испытаний на надежность, следует рассмотреть закономерности, которым они подчиняются.

**Случайное событие** - событие (факт, явление), которое в результате опыта может произойти или не произойти. Случайные события (отказы, восстановления, заявки на обслуживание и др.) образуют случайные потоки и случайные процессы. Поток событий - последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то отрезки времени. Например, отказы восстанавливаемого устройства образуют поток событий (поток отказов). Под действием потока отказов и потока восстановлений техническое устройство может находиться в различных состояниях (полного отказа, частичного отказа, работоспособное). Переход изделия из одного состояния в другое представляет собой случайный процесс.

**Случайная величина** - величина, которая в результате опыта может принимать то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно. Случайная величина может быть дискретной (число отказов за время  $t$ , число отказавших элементов при наработке заданного объема и



т.д.), либо непрерывной (время наработки элемента до отказа, время восстановления работоспособности).

Закон распределения случайной величины - соотношение, устанавливающее связь между значениями случайной величины и их вероятностями. Он может быть представлен формулой, таблицей, многоугольником распределений.

Для характеристики случайной величины (непрерывной и дискретной) используется вероятность того, что случайная величина  $X$  меньше некоторой текущей переменной  $x$ .

Функция распределения случайной величины  $X$  - функция вида  $F(x)$ , определяющую вероятность того, что случайная величина  $X$  в результате испытания примет значение меньшее  $x$ , т.е.  $F(x) = P(X < x)$ .

Непрерывную случайную величину можно задать плотностью распределения.

Плотностью распределения вероятностей непрерывной случайной величины  $X$  называют функцию  $f(x)$  - первую производную от функции распределения  $F(t)$ :  $f(x) = F'(t)$ .

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x); \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1; \int_{-\infty}^x f(x) dx = F(x) \quad (3.1)$$

В теории надежности за случайную величину обычно принимают время работы изделия (время до возникновения отказа). В этом случае функция плотности распределения  $f(t)$  будет служить полной характеристикой рассеивания сроков службы элементов (рис. 3.1). Вид этой функции зависит от закономерностей процесса потери элементов работоспособности.

Кривая распределения  $f(t)$  - частота отказов - дает возможность подсчитать средний срок службы элемента

$T_{cp}$  (математическое ожидание  $M[t]$ ), рассеивание (дисперсию  $D$ ) этих сроков службы относительно центра группирования и другие числовые параметры случайной величины  $T$ .

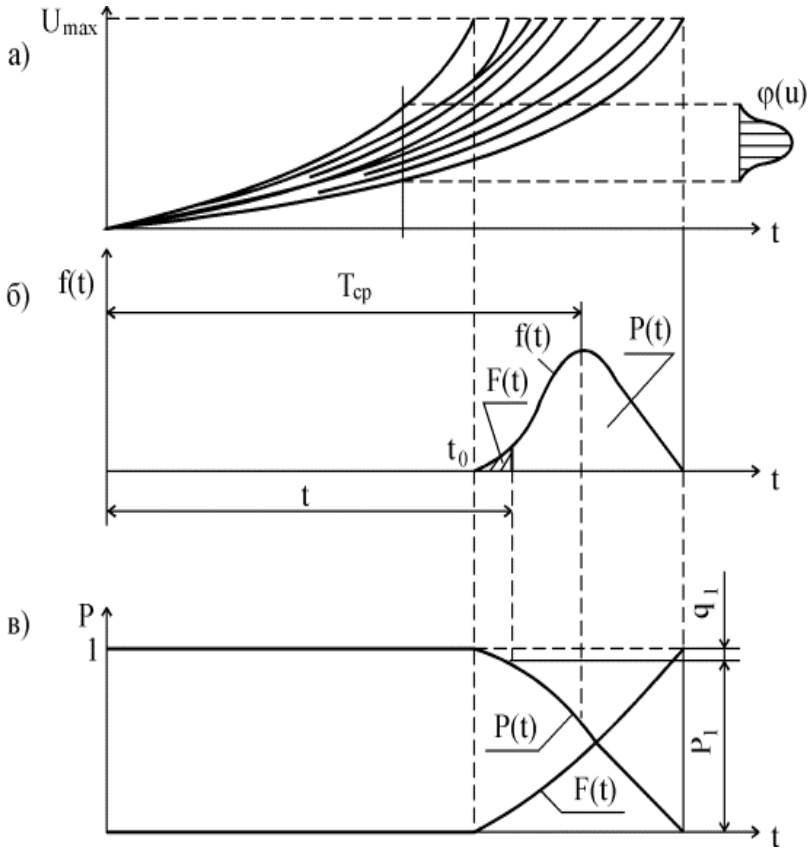


Рис. 3.1. Кривые распределения случайной величины при износных (постепенных) отказах:

а - реализация функции износа  $\varphi(U)$ ;

б - плотность распределения сроков службы  $f(t)$ ;

в - интегральная функция распределения  $F(t)$  и вероятность безотказной работы  $P(t)$

Если взять некоторый период времени работы элемента  $t$ , то площадь  $F(t)$  кривой распределения  $f(t)$  будет характеризовать вероятность отказа (выхода из строя) элемента за этот период времени (рис. 3.1,б). Поэтому левая ветвь кривой распределения  $f(t)$ , относящаяся к области малой вероятности отказов, используется обычно для характеристики безотказности работы изделия, а вся кривая  $f(t)$  и ее параметры необходимы для оценки его долговечности.

Ординаты интегральной функции распределения  $F(t)$  (рис. 3.1в) характеризуют вероятность отказа детали до данного момента времени

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (3.2)$$

Во многих случаях нет необходимости пользоваться функциями  $F(t)$  или  $f(t)$ , достаточно знать числовые характеристики этих кривых.

Основной характеристикой положения кривой  $f(t)$  является математическое ожидание  $M[t]$ , которое в нашем случае является средним сроком службы  $T_{cp}$  (наработкой на отказ):

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (3.3)$$

Основной характеристикой рассеивания случайной величины является дисперсия  $D$  или среднее квадратическое отклонение  $\sigma = \sqrt{D}$

$$D(t) = \int_0^{\infty} (T_{\text{ср}} - t)^2 f(t) dt . \quad (3.4)$$

Дисперсией (D) случайной величины называют математическое ожидание квадрата отклонения этой величины от ее математического ожидания. Чем больше значение D (или соответственно  $\sigma$ ), тем больше рассеивание сроков службы относительно их среднего значения  $M[t]$ .

Для оценки надежности работы элемента, принимая за основную случайную величину время до возникновения отказа, можно определить и вероятность безотказной работы  $P(t)$  в пределах заданного периода  $t$ . Для этого воспользуемся значением интегральной функции по формуле (3.2):

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt .$$

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  относится к событию, противоположному появлению отказа  $F(t)$ . Поэтому  $F(t) + P(t) = 1$ . Следовательно,  $P(t)$  определяется  $P(t) = 1 - F(t)$ .

В этом случае:

функция распределения отказа  $F(t) = P(t < t_{\text{зад}}) = Q(t)$ ;

плотность распределения  $f(t) = dQ(t)/dt$ ;

вероятность безотказности изделия за время  $t$   $P(t) = 1 - Q(t)$ .

Интенсивность отказов (условная плотность вероятности отказов) - отношение  $f(t)$  к  $P(t)$ :

$$\lambda(t) = f(t) / P(t). \quad (3.5)$$

Для решения задач о оценке надежности и прогнозировании работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель, которая представлена аналитическими выражениями одного из показателей  $P(t)$  или  $f(t)$  или  $\lambda(t)$ . Основным путем получения модели состоит в проведе-

нии испытаний, вычислении статических оценок и их аппроксимации аналитическими функциями.

Типичная функция интенсивности отказов изображена на рис. 3.2.

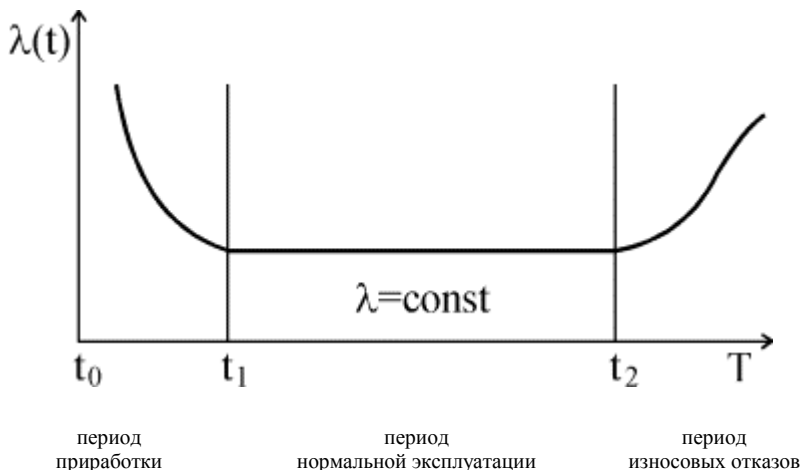


Рис. 3.2 Типичная функция интенсивности отказов

Кривую можно условно разделить на три характерных участка:

- первый – период приработки,
- второй – период нормальной эксплуатации,
- третий – период старения объекта.

Участок убывающей интенсивности отказов ( $t_0$ – $t_1$ ) называют периодом приработки или периодом ранних отказов. Период приработки объекта имеет повышенную интенсивность отказов, вызванную приработочными отказами, обусловленными дефектами конструкций, производства, монтажа, наладки. Иногда с окончанием этого периода связывают гарантийное обслуживание объекта, когда устранение отказов производится изготовителем.

Участок постоянной интенсивности отказов ( $t_1-t_2$ ) называют периодом нормальной эксплуатации. Этот период начинается сразу же после периода приработки. В период нормальной эксплуатации интенсивности отказов уменьшается и практически остается постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего из-за несоблюдения условий эксплуатации, случайных изменений нагрузки, неблагоприятных внешних факторов и т. п. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации объекта и заканчивается он непосредственно перед периодом износовых отказов.

Период износовых отказов начинается тогда, когда элемент (устройство) выработал свой ресурс, вследствие чего интенсивность отказов в этом периоде начинает возрастать. Рост интенсивности отказов в этот период связан с увеличением числа отказов от износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией.

Отказы, появляющиеся в периоде нормальной эксплуатации, называют внезапными, так как они появляются в случайные моменты времени, или, другими словами, внезапно, непредсказуемо.

### **3.2 Статистическая обработка результатов испытаний и определение показателей надежности**

#### ***1. Постановка задачи***

По результатам испытаний  $N$  невозстанавливаемых одинаковых объектов получена статистическая выборка – массив наработки (в любых единицах измерения) до отказа каждого из  $N$  испытывавшихся объектов. Выборка характеризует случайную величину наработки до отказа объекта  $T = \{t\}$ .

Необходимо выбрать закон распределения случайной величины  $T$  и проверить правильность выбора по соответствующему критерию.

Подбор закона распределения осуществляется на основе аппроксимации (сглаживания) экспериментальных данных о наработке до отказа, которые должны быть представлены в наиболее компактном графическом виде. Выбор той или иной аппроксимирующей функции носит характер гипотезы, которую выдвигает исследователь. Экспериментальные данные могут с большим или меньшим правдоподобием подтверждать или не подтверждать справедливость той или иной гипотезы. Поэтому исследователь должен получить ответ на вопрос: согласуются ли результаты эксперимента с гипотезой о том, что случайная величина наработки подчинена выбранному им закону распределения? Ответ на этот вопрос дается в результате расчета специальных критериев.

## ***2. Алгоритм обработки результатов и расчета показателей надежности***

### *2.1. Формирование статистического ряда*

При большом числе испытываемых объектов полученный массив наработок  $\{\dots, t_i, \dots\}$  является громоздкой и мало наглядной формой записи случайной величины  $T$ . Поэтому для компактности и наглядности выборка представляется в графическом изображении статистического ряда – гистограмме наработки до отказа. Для этого необходимо:

- установить интервал наработки  $[t_{min}, t_{max}]$  и его длину,
- разбить интервал наработки  $[t_{min}, t_{max}]$  на  $k$  интервалов равной ширины  $\Delta t$  – шаг гистограммы,
- подсчитать частоты появления отказов во всех  $k$  интервалах

$$\hat{P}_i = \frac{\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)}{N} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N}, \quad (3.6)$$

где  $\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)$  – число объектов, отказавших в интервале  $[t_i, t_i + \Delta t]$ .

Очевидно, что

$$\sum_I^k \hat{P}_i = 1; \quad (3.7)$$

- полученный статистический ряд представляется в виде гистограммы, которая строится следующим образом. По оси абсцисс ( $t$ ) откладываются интервалы  $\Delta t$ , на каждом из которых, как на основании, строится прямоугольник, высота которого пропорциональна (в выбранном масштабе)

соответствующей частоте  $\hat{P}$ . Возможный вид гистограммы приведен на рис. 3.3.

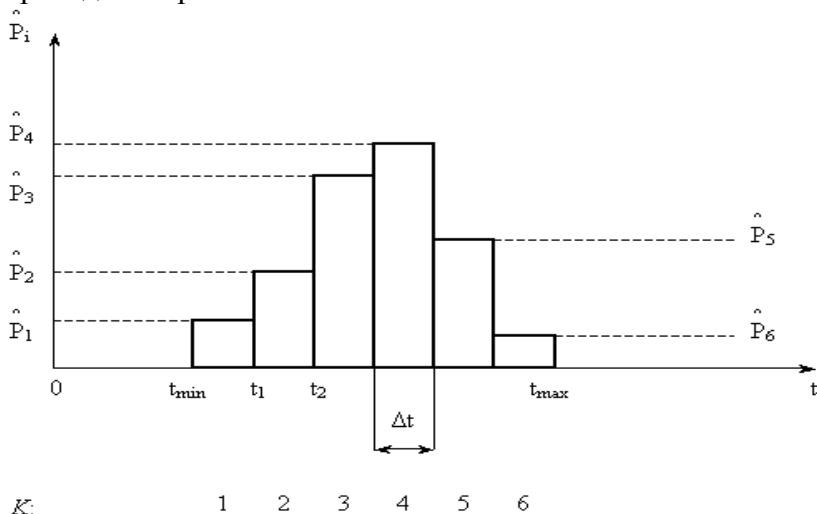


Рис. 3.3 Гистограмма статистического ряда



## 2.2. Расчет эмпирических функций

Используя данные сформированного статистического ряда, определяются статистические оценки показателей надежности, т. е. эмпирические функции:

- функция распределения отказов (оценка вероятности отказов),
- функция надежности (оценка вероятности безотказной работы),
- плотность распределения отказов,
- интенсивность отказов.

## 2.3. Расчет статистических оценок числовых характеристик

Для расчета статистических оценок числовых характеристик можно воспользоваться данными сформированного статистического ряда.

Оценки характеристик определяются:

- оценка средней наработки до отказа (статистическое среднее наработки),
- оценка дисперсии наработки до отказа (эмпирическая дисперсия наработки).

Целесообразно рассчитать оценки и некоторых вспомогательных характеристик рассеивания случайной величины  $T$ :

- выборочный коэффициент асимметрии наработки до отказа,
- выборочный эксцесс наработки до отказа.

Эти характеристики используются для выбора аппроксимирующей функции.

Так коэффициент асимметрии является характеристикой «скошенности» распределения, например, если распределение симметрично относительно математического ожидания, то  $A = 0$ .

На рис. 3.4, а распределение  $f_2(t)$  имеет положительную асимметрию  $A > 0$ , а  $f_3(t)$  – отрицательную  $A < 0$ .

Экссес характеризует «крутость» (остро- или плоско-вершинность) распределения.

Для нормального распределения  $E = 0$ .

Кривые  $f(t)$ , более островершинные по сравнению с нормальной, имеют  $E > 0$ , а наоборот – более плосковершинные,  $E < 0$  (рис.3.4, б).

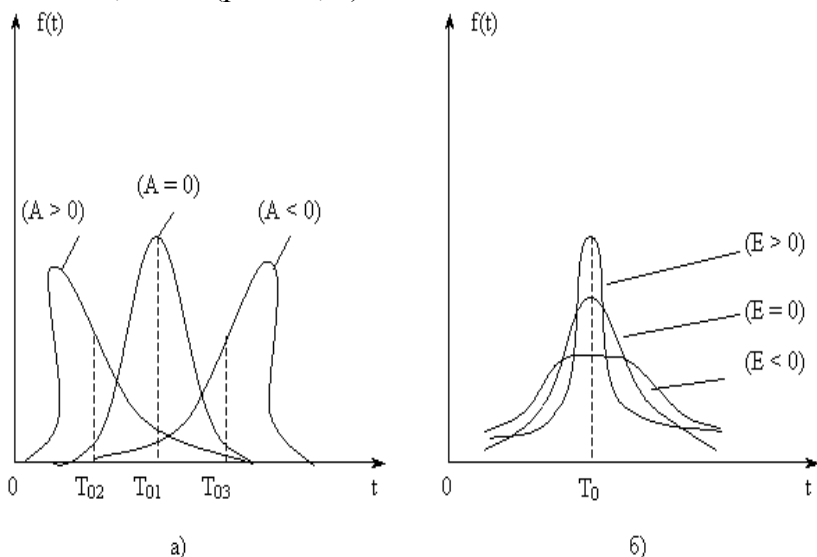


Рис. 3.4 Кривые распределения  $f(t)$ :  
а) коэффициент асимметрии; б) эксцесс распределения.

#### 2.4. Выбор закона распределения

Выбор закона распределения состоит в подборе аналитической функции наилучшим образом аппроксимирующей эмпирические функции надежности.

Выбор, в значительной мере, процедура неопределенная и во многом субъективная, при этом многое зависит от априорных знаний об объекте и его свойствах, условиях работы, а также анализа вида графиков  $\hat{P}(t)$ ,  $\hat{f}(t)$ ,  $\hat{\lambda}(t)$ .

Выбор закона распределения носит характер принятия той или иной гипотезы.

Предположим, что по тем или иным соображениям, выбран гипотетический закон распределения, заданный теоретической плотностью распределения отказов

$$f(t) = \Psi(t, a, b, c, \dots),$$

где  $a, b, c, \dots$  - неизвестные параметры распределения.

Требуется подобрать эти параметры так, чтобы функция  $f(t)$  наилучшим образом сглаживала ступенчатый график  $\hat{f}(t)$ . При этом используется следующий прием: параметры  $a, b, c, \dots$  выбираются с таким расчетом, чтобы несколько важнейших числовых характеристик теоретического распределения были равны соответствующим статистическим оценкам.

На графике вместе с  $\hat{f}(t)$  строится теоретическая плотность распределения отказов  $f(t)$ , что позволяет визуально оценить результаты аппроксимации (расхождения между  $\hat{f}(t)$  и  $f(t)$ ). Поскольку эти расхождения неизбежны, то возникает вопрос: объясняются ли они случайными обстоятельствами, связанными с тем, что теоретическое распределение выбрано ошибочным? Ответ на этот вопрос дает расчет критерия согласия.

### 2.5. Расчет критерия согласия

*Критерий согласия* – это критерий проверки гипотезы о том, что случайная величина  $T$ , представленная своей выборкой, имеет распределение предполагаемого типа.

*Проверка состоит в следующем.* Рассчитывается критерий, как некоторая мера расхождения теоретического и эмпирического распределений, причем эта мера является случайной величиной.

Чем больше мера расхождения, тем хуже согласованность эмпирического распределения с теоретическим, то гипотезу о выборе закона распределения следует отвергнуть, как мало правдоподобную.

В противном случае – экспериментальные данные не противоречат принятому распределению.

Из известных критериев наиболее применяемый критерий согласия  $\chi^2$  (хи-квадрат) Пирсона.

Проверка согласованности распределений по критерию  $\chi^2$  производится следующим образом:

1) рассчитывается критерий  $\chi^2$  (мера расхождения)

$$\chi^2 = N \cdot \sum_1^k (\hat{P}_i - P_i)^2 / P_i, \quad (3.8)$$

где  $P_i = f(\tilde{t}_i) \Delta t$  – теоретическая частота (вероятность) попадания случайной величины в интервал  $[t_i, t_i + \Delta t]$ ;

2) определяется число степеней свободы  $R = k - L$ ,

где  $L$  – число независимых условий, наложенных на

частоты  $\hat{P}_i$ , например:

а) условие  $\sum \hat{P}_i = 1$ ;

б) условие совпадения  $\sum \tilde{t}_i \cdot \hat{P}_i = T_0$ ;

в) условие совпадения  $\sum (\tilde{t}_i - T_0)^2 \cdot \hat{P}_i = D$  и т. д.

Чаще всего  $L = 3$ . Чем больше число степеней свободы, тем больше случайная величина  $\chi^2$  подчиняется распределению Пирсона;

3) по рассчитанным  $\chi^2$  и  $R$  определяется вероятность  $P$  того, что величина, имеющая распределение Пирсона с  $R$  степенями свободы, превзойдет рассчитанное значение  $\chi^2$ .

Ответ на вопрос: насколько мала должна быть вероятность  $P$ , чтобы отбросить гипотезу о выборе того или иного закона распределения – во многом неопределенный.

На практике, если  $P < 0,1$ , то рекомендуется подыскивать другой закон распределения.

В целом, с помощью критерия согласия, можно опровергнуть выбранную гипотезу, если же  $P$  достаточно велика, то это не может служить доказательством правильности гипотезы, а указывает лишь на то, что гипотеза не противоречит данным эксперимента.

### **3.3 Основные законы распределения, используемые в теории надежности**

В теории надежности наибольшее распространение получили следующие законы распределения случайных величин  $f(t)$ :

для дискретных (прерывного типа) случайных величин - биномиальный закон; закон Пуассона;

для непрерывных случайных величин - экспоненциальный закон; нормальный закон; гамма-распределение; закон Вейбулла;  $\chi^2$ - распределение; логарифмически-нормальное распределение.

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

**Непрерывной величиной** называют случайную величину, которая может принимать все значения из некоторого конечного или бесконечного промежутка. (Число возможных значений непрерывной случайной величины бесконечно).

### 3.3.1 Биномиальный закон

**Биномиальный закон** распределения числа  $n$  появления события  $A$  в  $m$  независимых опытах (испытаниях). Если вероятность появления события  $A$  в одном испытании равна  $p$ , вероятность не появления события  $A$  равна  $q=1-p$ ; число независимых испытаний равно  $m$ , то вероятность появления  $n$  событий в испытаниях будет

$$P_m^n = C_m^n p^n (1-p)^{m-n}, \quad (3.9)$$

где  $C_m^n$  - число сочетаний из  $m$  по  $n$ ;  $n$  - количество независимых испытаний,  $p$  – вероятность наступления события во всех испытаниях.

Свойства распределения следующие:

- 1) число событий  $n$  - целое положительное число;
- 2) математическое ожидание числа событий равно  $mp$ ;
- 3) среднеквадратическое отклонение числа событий

$$\sigma = \sqrt{mp(1-p)}. \quad (3.10)$$

При увеличении числа испытаний биномиальное распределение приближается к нормальному со средним значением  $n/m$  и дисперсией  $p(1-p)/m$ .

### 3.2 Закон Пуассона

**Закон Пуассона** - распределение чисел случайного события  $n_i$  за время  $t$ . Вероятность возникновения случайного события  $n$  раз за время  $t$  определяется по формуле:

$$P_t(n) = (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n!, \quad (3.11)$$

где  $\lambda$  - интенсивность случайного события (среднее число событий),  $t$  – время за которое произойдет случайное событие,  $n$  – вероятность появления события за время  $t$ .

Распределение Пуассона является однопараметрическим с параметром  $\lambda$ .

Свойства распределения следующие:

- 1) математическое ожидание и дисперсия случайной величины  $X$  равны параметру распределения  $\lambda$ :  $M_x = D_x = \lambda$
- 2) среднеквадратическое отклонение числа событий

$$\sigma = \sqrt{\lambda t}. \quad (3.12)$$

Характерный признак распределения Пуассона - равенство математического ожидания и дисперсии. Это свойство используется для проверки степени соответствия исследуемого (опытного) распределения с распределением Пуассона.

Распределение Пуассона получается из биномиального распределения, если число испытаний  $m$  неограниченно возрастает, а математическое ожидание числа событий  $a = \lambda t$  остается постоянным.

Тогда вероятность  $P_m^n$  биномиального распределения при каждом  $n$ , равном  $0, 1, 2, \dots$ , стремится к пределу

$$P_m^n \rightarrow \frac{(a)^n}{n!} \exp(-a)$$

где  $a$  – математическое ожидание числа событий.

Распределение Пуассона описывает закономерность появления случайных отказов в сложных системах и используется тогда, когда необходимо определить вероятность того, что в изделии за заданное время произойдет один, два, три и т.д. отказов. Этот закон нашел широкое применение при определении вероятности появления и восстановления отказов.

### 3.3.3 Экспоненциальный закон

Экспоненциальное (показательное) распределение описывает наработку до отказа объектов, у которых в результате сдаточных испытаний (выходного контроля) отсутствует период приработки, а назначенный ресурс установлен до окончания периода нормальной эксплуатации.

Эти объекты можно отнести к «не стареющим», поскольку они работают только на участке с  $\lambda(t) = \lambda = const$ . Круг таких объектов широк: сложные технические системы с множеством компонентов, средства вычислительной техники и системы автоматического регулирования и т. п. Экспоненциальное распределение широко применяется для оценки надежности энергетических объектов.

Экспоненциальный (показательный) закон распределения случайной величины  $X$  (рис. 3.5 а) записывается в общем случае так:  $P(x) = \exp(-\lambda x)$ , где  $P(x)$  - вероятность того, что случайная величина  $X$  имеет значение больше  $x$ ; значения  $e^{-x}$  даются в прилож. 1.

В частном случае, когда за случайную величину принимается время работы объекта  $t$ , вероятность того, что изделие на протяжении времени  $t$  будет находиться в работоспособном состоянии, равна  $\exp(-\lambda t)$ :

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (3.13)$$

где  $\lambda$  - интенсивность отказов объекта для экспоненциального распределения (она постоянна), т.е.  $\lambda = const$ .

Выражение (2.13) можно получить непосредственно из (2.11), если число отказов  $n$  принять равным 0.

Вероятность отказа за время  $t$  из (2.13) определяется по формуле:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \exp(-\lambda t). \quad (3.14)$$

Плотность вероятности отказов записывается в виде

$$f(t) = \partial Q / \partial t = \lambda \exp(-\lambda t). \quad (3.15)$$



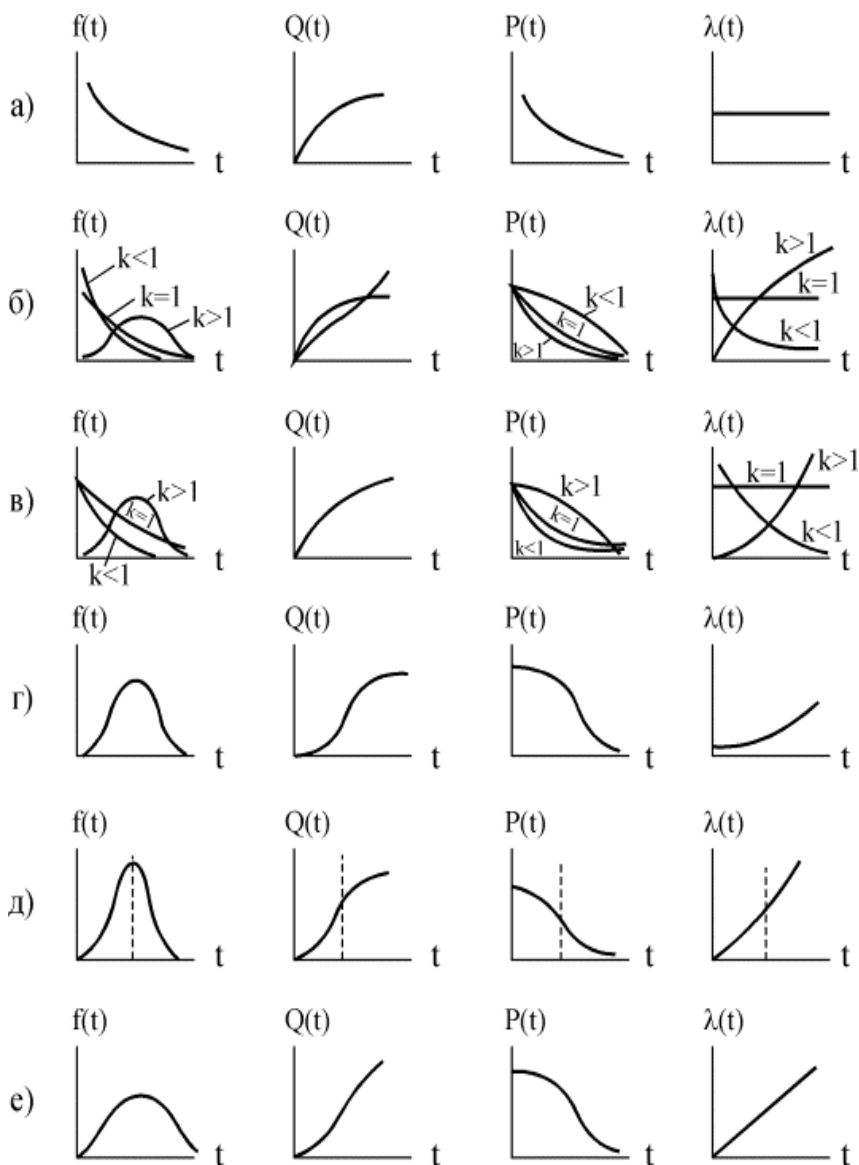


Рис. 3.5. Распределения: а – экспоненциальное;  
 б -  $\gamma$ -распределение; в - Вейбулла;  
 г - нормальное; д - усеченное нормальное; е – Рэлея

Числовые характеристики наработки до отказа определяются:

- среднее время работы до возникновения отказа

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt = 1/\lambda. \quad (3.16)$$

- дисперсия времени работы до возникновения отказа

$$D(t) = \int_0^{\infty} (t - T_1)^2 f(t) dt = 1/\lambda^2. \quad (3.17)$$

Равенство среднеквадратического отклонения среднему времени работы - характерный признак экспоненциального распределения:

$$\sigma(t) = T_1$$

где  $\sigma(t)$  - среднеквадратическое время работы.

Статистические материалы об отказах элементов свидетельствуют о том, что в основном время их работы подчиняется экспоненциальному закону распределения. Условием возникновения экспоненциального закона распределения времени до отказа служит постоянство интенсивности отказов, что характерно для внезапных отказов на интервале времени, когда период приработки объекта закончился, а период износа и старения еще не начался, т.е. для нормальных условий эксплуатации. Постоянной становится интенсивность отказов сложных объектов, если вызываются они отказами большого числа комплектующих элементов.

Время возникновения первичных отказов может быть расположено на оси времени так, что суммарный поток отказов сложного изделия становится близким к простейшему, т.е. с постоянной интенсивностью отказов.

Этими обстоятельствами, а также тем, что предположение об экспоненциальном распределении существен-

но упрощает расчеты надежности, объясняется широкое применение экспоненциального закона в инженерной практике.

### 3.3.4 Гамма-распределение

Гамма-распределение случайной величины представлено на рис. 3.5,б. Гамма-распределение является двухпараметрическим распределением. Оно занимает важное место в теории надежности. Если отказ устройства возникает тогда, когда произойдет не менее  $k$  отказов его элементов, а отказы элементов подчинены экспоненциальному закону с параметрами  $\lambda_0$ , плотность вероятности отказа устройства и определяются по формуле:

$$f(t) = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\lambda_0 t), \quad (3.18)$$

где  $\lambda_0$  - исходная интенсивность отказов элементов устройства, отказ которого вызывается отказом  $k$  элементов,  $(k-1)!$  – гамма-функция Эйлера.

Гамма-распределение широко применяется при описании появления отказов стареющих элементов, времени восстановления, наработки на отказ резервированных систем.

Вероятность  $k$  и более отказов, т.е. вероятность отказа данного устройства,

$$P(n \geq k) = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} \exp(-\lambda_0 t). \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} &\text{Среднее время работы устройства до отказа} \\ T_1 &= kT_0 = k / \lambda_0. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Интенсивность отказов устройства

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0}{(k-1)!} \frac{(\lambda_0 t)^{k-1}}{\sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{i!} (\lambda_0 t)^i}. \quad (3.21)$$

Вероятность безотказного состояния устройства

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{i!} (\lambda_0 t)^i. \quad (3.22)$$

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

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

При увеличении  $k$   $\gamma$ -распределение будет приближаться к симметричному распределению, а интенсивность отказов будет иметь все более выраженный характер возрастающей функции времени.

### 3.3.5 Распределение Вейбулла

Закон Вейбулла представляет собой двухпараметрическое распределение. Этот закон является универсальным, так как при соответствующих значениях параметров превращается в нормальное, экспоненциальное и другие виды распределений. Автор данного закона использовал его при описании экспериментально наблюдавшихся разбросов усталостной прочности стали, пределов ее упруго-

сти. Закон Вейбулла удовлетворительно описывает наработку до отказа подшипников, элементов радиоэлектронной аппаратуры, его используют для оценки надежности деталей и узлов машин, в частности автомобилей, а также оценки надежности машин в процессе их приработки.

Для случая, когда поток отказов не стационарный, т.е. плотность потока изменяется с течением времени, функция распределения времени до отказа приобретает вид, показанный на рис. 3.5, в.

Показатели надежности этого распределения определяются:

- плотность вероятности отказов

$$f(t) = \lambda \alpha t^{\alpha-1} \exp(-\lambda_0 t^\alpha), \quad (3.23)$$

где  $\alpha$  (на рис. К) - параметр формы кривой распределения

- вероятность отсутствия отказа за время  $t$

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t^\alpha). \quad (3.24)$$

- интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1}. \quad (3.25)$$

В (3.23) - (3.25)  $\alpha$  и  $\lambda_0$  - параметры закона распределения. Параметр  $\lambda_0$  определяет масштаб, при его изменении кривая распределения сжимается или растягивается. При  $\alpha = 1$  функция распределения Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением; при  $\alpha < 1$  интенсивность отказов будет монотонно убывающей функцией; при  $\alpha > 1$  - монотонно возрастающей. Это обстоятельство дает возможность подбирать для опытных данных наиболее подходящие параметры  $\alpha$  и  $\lambda_0$ , с тем чтобы уравнение функции распределения наилучшим образом совпадало с опытными данными. Распределение Вейбулла имеет место для отказов, возникающих по причине усталости тела детали или поверхностных слоев (подшипники, зубчатые передачи). Этот случай связан с развитием усталостной тре-

щины в зоне местной концентрации напряжений, технологического дефекта или начального повреждения. Период времени до зарождения микротрещины характеризуется признаками внезапного отказа, а процесс разрушения - признаками износосового отказа.

Этот закон применим для отказов устройства, состоящего из последовательно соединенных дублированных элементов и других подобных случаев.

Это распределение иногда используется для описания надежности подшипников качения ( $\alpha = 1,4 - 1,7$ ).

Средняя наработка до первого отказа определится из следующего выражения:

$$T = \frac{\Gamma(1/\alpha + 1)}{\lambda_0^{1/\alpha}}. \quad (3.26)$$

Значения  $\Gamma$  (гамма-функции) табулированы (прилож. 2).

### 3.3.6 Нормальное распределение

Нормальное распределение или распределение Гаусса является наиболее универсальным, удобным и широко применяемым.

Нормальное распределение (рис. 3.5, г) случайной величины  $X$  возникает всякий раз, когда  $X$  зависит от большого числа однородных по своему влиянию случайных факторов, причем влияние каждого из этих факторов по сравнению с совокупностью всех остальных незначительно. Это условие характерно для времени возникновения отказа, вызванного старением, т.е. этот закон используется для оценки надежности изделий при наличии постепенных (износосовых) отказов.

Плотность вероятности отказов описывается выражением:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(t-T)^2/2\sigma^2], \quad (3.27)$$

где  $T$  - средняя наработка до отказа;  $\sigma$  - среднее квадратическое (стандартное) отклонение времени безотказной работы.

Вероятность отказа за время  $t$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp[-(t-T)^2/2\sigma^2] dt. \quad (3.28)$$

Значения  $F(t)$  табулированы (прилож. 3).

В практических расчетах часто вместо функции  $F(x)$  пользуются функцией Лапласа ( $\Phi(x)$ ):

$$F(t) = 0,5 + \Phi(u) = Q(t); \quad u = (t-T) / \sigma. \quad (3.29)$$

Вероятность отсутствия отказа за время  $t$

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - [0,5 + \Phi(u)] = 0,5 - \Phi(u). \quad (3.30)$$

Вероятность отказа и интенсивность отказов объекта можно определить через  $\Phi(x)$ :

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(x), \quad (3.31)$$

$$\lambda(t) = f(x) / \sigma(0,5 - \Phi(x)) \quad (3.32)$$

График  $\lambda(t)$  показан на рис. 3.5, г. Интенсивность отказов монотонно возрастает и после  $T$  начинает приближаться к асимптоте:

$$u = (t-T) / \sigma. \quad (3.33)$$

Монотонное возрастание интенсивности отказов с течением времени - характерный признак нормального распределения. Нормальное распределение существенно отличается от экспоненциального. Началом отсчета времени  $t$  в (2.28) служит начало эксплуатации объекта, т.е. момент, когда начинается процесс износа и старения, а началом отсчета - момент времени, когда установлено, что изделие исправно (этот момент может быть расположен в любой точке на оси времени).

Чаще всего при оценке надежности объекта приходится решать **прямую задачу** – при заданных параметрах  $T_0$  и  $\sigma$  нормально распределенной наработки до отказа определяется тот или иной показатель безотказности (например, вероятность безотказной работы) к интересующему значению наработки  $t$ . Но в ходе проектных работ приходится решать и **обратную задачу** – определение наработки, требуемой по техническому заданию, вероятность безотказной работы объекта.

Для решения подобных задач используют квантили нормированного нормального распределения.

*Квантиль* – значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности.

Обозначим:

$t_p$  – значение наработки, соответствующее вероятность безотказной работы  $P$ ;

$x_p$  – значение случайной величины  $X$ , соответствующее вероятности  $P$ .

Тогда из уравнения связи  $x$  и  $t$ :

$$x_p = \frac{t_p - T_0}{S}$$

при  $x = x_p$ ;  $t = t_p$ , получаем  $t_p = T_0 + x_p S$ , ( $S = \sigma$ )

$t_p$ ,  $x_p$  – ненормированные и нормированные квантили нормального распределения, соответствующие вероятности  $P$ .

Значения квантилей  $x_p$  (при  $P \geq 0,5$ ) приводятся в таблице 3.1.

При заданной вероятности  $P < 0,5$  используется соотношение

$$x_p = -x_{1-p}$$

Например, при  $P = 0,3$

$$x_{0,3} = -x_{1-0,3} = -x_{0,7}$$



Таблица 3.1

**Нормальное распределение**

Квантиль $x_p$	Вероятность безотказной работы P(t)	Квантиль $x_p$	Вероятность безотказной работы P(t)
0,0	0,5000	-1,282	0,9000
-0,1	0,5398	-1,400	0,9192
-0,2	0,5793	-1,600	0,9452
-0,3	0,6179	-1,800	0,9641
-0,4	0,6552	-2,000	0,9772
-0,5	0,6915	-2,200	0,9861
-0,6	0,7257	-2,326	0,9900
-0,7	0,7580	-2,500	0,9938
-0,8	0,7881	-3,090	0,9990
-0,9	0,8159	-3,500	0,9998
-1,0	0,8413	-3,719	0,9999

Вероятность попадания случайной величины наработки  $T$  в заданный интервал  $[t_1, t_2]$  наработки определяется:

$$P\{T \in (t_1, t_2)\} = F(x_2) - F(x_1) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1), \quad (3.34)$$

где  $x_1 = (t_1 - T_0)/\sigma$ ,  $x_2 = (t_2 - T_0)/\sigma$ .

Отметим, что наработка до отказа всегда положительна, а кривая плотность распределения отказов  $f(t)$ , в общем случае, начинается от  $t = -\infty$  и распространяется до  $t = \infty$ .

Это не является существенным недостатком, если  $T_0 \gg \sigma$ , поскольку по (14) нетрудно подсчитать, что вероятность попадания случайной величины  $T$  в интервал  $P\{T_0 - 3\sigma < T < T_0 + 3\sigma\} \approx 1,0$  с точностью до 1%. А это означает, что все возможные значения (с погрешностью не выше 1%) нормально распределенной случайной величины с со-

отношением характеристик  $T_0 > 3 \sigma$ , находятся на участке  $T_0 \pm 3 \sigma$ .

При большем разбросе значений случайной величины  $T$  область возможных значений ограничивается слева  $(0, \infty)$  и используется усеченное нормальное распределение.

### 3.3.7 Усеченное нормальное распределение

(рис. 3.5, д).

Известно, что корректность использования классического нормального распределения наработки, достигается при  $T_0 \geq 3 \sigma$  ( $\sigma$  - среднее квадратичное отклонение).

При малых значениях  $T_0$  и большом  $\sigma$ , может возникнуть ситуация, когда плотность распределения отказов  $f(t)$  «покрывает» своей левой ветвью область отрицательных наработок (рис. 3.6).

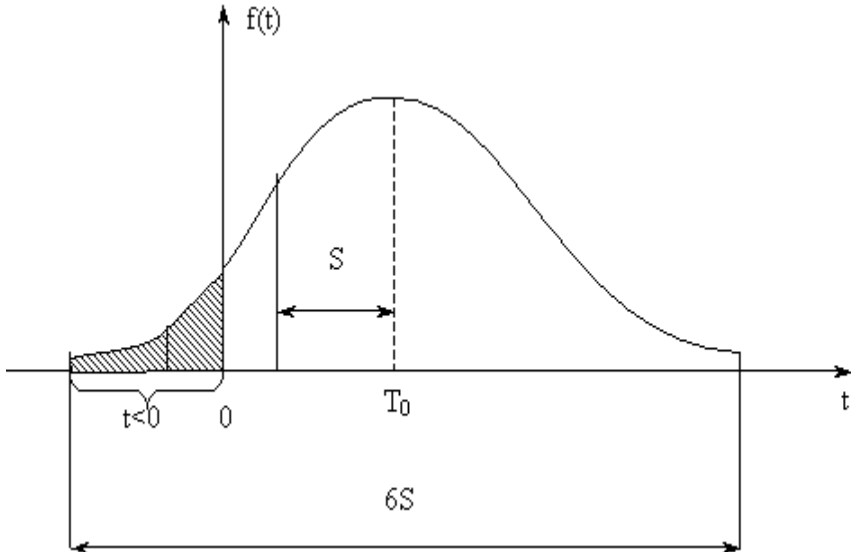


Рис. 3.6

Таким образом, нормальное распределение, являясь общим случаем распределения случайной величины в диапазоне  $(-\infty; \infty)$ , лишь в частности (при определенных условиях) может быть использовано для моделей надежности.

**Усеченным нормальным распределением** называется распределение, получаемое из классического нормального, при ограничении интервала возможных значений наработки до отказа.

В общем случае усечение может быть:

- *левым* –  $(0; \infty)$ ;
- *двусторонним* –  $(t_1, t_2)$ .

Кривые показателей надежности при усеченном нормальном распределении представлены на рис. 2.5, д. Так как при нормальном распределении случайная величина может принимать любые значения от  $-\infty$  до  $+\infty$ , а время безотказной работы может быть только положительным, следует рассматривать усеченное нормальное распределение с плотностью вероятности отказов

$$f(t) = \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(t-T_1)^2/2\sigma^2]. \quad (3.35)$$

Нормирующий множитель  $c$  определяется из выражения

$$c \int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (3.36)$$

и равен  $c = 1/F(T_1/\sigma) = 1/[0,5 + \Phi_0(T_1/\sigma)]$ , (3.37)

где  $F(T_1/\sigma) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{T_1/\sigma} \exp(-x^2/2) dx$  (3.38)

- табулированная (прилож. 4) интегральная функция нормального распределения;

$$\Phi_0(T_1/\sigma) = 1/2p \int_{-\infty}^{T_1/\sigma} \exp\left(-x^2/2\right) dx \quad (3.39)$$

- нормированная функция Лапласа.

Тогда (2.35) запишется следующим образом:

$$f(t) = \frac{1}{F(T_1/\sigma)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(t-T_1)^2/2\sigma^2]. \quad (3.40)$$

Средняя наработка до отказа в усеченном распределении и параметр  $T_1$  неусеченного нормального распределения связаны зависимостью

$$T = T_1 + f(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi} F(T_1/\sigma)} \exp\left(-T_1^2/2\sigma^2\right). \quad (3.41)$$

При  $T/\sigma \geq 2$ , что имеет место в абсолютном большинстве случаев при оценке надежности устройств с нормально распределенными отказами, коэффициент  $c$  мало отличается от единицы и усеченное нормальное распределение достаточно точно аппроксимируется обычным нормальным законом.

Вероятность безотказной работы определяется из выражения

$$P(t) = \frac{F[(T_1 - t)/\sigma]}{F(T_1/\sigma)}. \quad (3.42)$$

Интенсивность отказов находится из

$$\lambda(t) = \frac{\exp\left[-(t - T_1)^2/2\sigma^2\right]}{\sqrt{2\pi} \sigma F((T_1 - t)/\sigma)}. \quad (3.43)$$

### 3.3.8 Логарифмически нормальное (логнормальное) распределение

При логарифмически нормальном распределении нормально распределенным является логарифм ( $\lg t$ ) случайной величины  $T$ , а не сама эта величина.

Логарифмически нормальное распределение во многом более точно, чем нормальное описывает наработку до отказа тех объектов, у которых отказ возникает вследствие усталости, например, подшипников качения, электронных ламп и пр.

Если величина  $\lg t$  имеет нормальное распределение с параметрами: математическое ожидание ( $U$ ) и среднеквадратичное отклонение ( $V$ ), то величина  $T$  считается логарифмически нормально распределенной с плотностью распределения отказов, описываемой:

$$f(t) = \frac{1}{Vt\sqrt{2\pi}} \exp(-(\lg t - U)^2/2V^2). \quad (3.44)$$

Параметры  $U$  и  $V$  по результатам испытаний принимаются:

$$U \approx \hat{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg t_i, \quad (3.45)$$

$$V \approx \hat{V} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lg t_i - \hat{U})^2, \quad (3.46)$$

где  $\hat{U}$  и  $\hat{V}$  - оценки параметров  $U$  и  $V$ .

Показатели надежности можно рассчитать пользуясь табулированными функциями  $f(x)$  и, соответственно,

$F(x)$  и  $\Phi(x)$  для нормального распределения при  $x = (\lg t - U) / V$ .

Графики изменения показателей надежности при логарифмически нормальном распределении приведены на рис. 3.7.

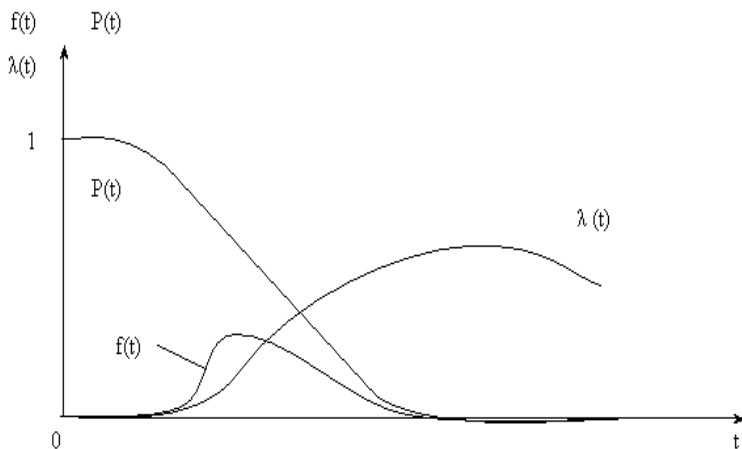


Рис. 3.7 Изменения показателей надежности при логарифмически нормальном распределении

Числовые характеристики наработки до отказа:

- средняя наработка (математическое ожидание наработки) до отказа

$$T_0 = \exp(U + V^2/2), \quad (3.47)$$

- дисперсия наработки до отказа

$$D = D\{T\} = \exp(2U + V^2) [\exp(V^2) - 1]. \quad (3.48)$$

### 3.3.9 Распределение Рэлея

Распределение Рэлея (рис. 3.5, е) - непрерывное распределение вероятностей с плотностью

$$p(x) = x/\sigma^2 \exp(-x^2/2\sigma^2) \text{ при } x > 0;$$

$$p(x) = 0 \text{ при } x \leq 0,$$

зависящей от масштабного параметра  $\sigma > 0$ . Распределение имеет положительную асимметрию, его единственная мода находится в точке  $x = \sigma$ . Все моменты распределения Рэлея конечны.

Также как и распределение Вейбулла или  $\gamma$ -распределение, распределение Рэлея пригодно для описания поведения изнашивающихся или стареющих изделий.

Частота отказов (функция плотности распределения вероятности отказов) определяется:

$$f(t) = t / \sigma^2 \exp(-t^2/2 \sigma^2). \quad (3.49)$$

Вероятность безотказной работы вычисляется из выражения

$$P(t) = \exp(-t^2/2 \sigma^2). \quad (3.50)$$

Интенсивность отказов находится из

$$\lambda(t) = t / \sigma^2. \quad (3.51)$$

Средняя наработка до первого отказа составит

$$T = \sqrt{\pi/2} \cdot \sigma. \quad (3.52)$$

### **3.4. О выборе закона распределения отказов при расчете надежности**

Для решения задач по оценке надежности и прогнозированию работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель, которая представлена аналитическими выражениями одного из показателей  $P(t)$  или  $f(t)$  или  $\lambda(t)$ . Основной путь для получения модели состоит в проведении испытаний, вычислении статистических оценок.

Определение закона распределения отказов имеет большое значение при исследованиях и оценках надежности. Определение  $P(t)$  по одной и той же исходной информации о  $T$ , но при различных предположениях о законе распределения может привести к существенно отличающимся результатам.

Закон распределения отказов можно определить по экспериментальным данным, но для этого необходимо

проведение большого числа опытов в идентичных условиях. Практически эти условия, как правило, трудно обеспечить. Кроме того, такое решение содержит черты пассивной регистрации событий.

Вместе с тем во многих случаях за время эксплуатации успевают отказать лишь незначительная доля первоначально имевшихся объектов. Полученным статистическим данным соответствует начальная (левая) часть экспериментального распределения.

Более рационально - изучение условий, физических процессов при которых возникает то или другое распределение. При этом составляются модели возникновения отказов и соответствующие им законы распределения времени до появления отказа, что позволяет делать обоснованные предположения о законе распределения.

Опытные данные должны служить средством проверки обоснованности прогноза, а не единственным источником данных о законе распределения. Такой подход необходим для оценки надежности новых изделий, для которых статистический материал весьма ограничен.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что является объектом исследования при анализе надежности?
2. Что представляет математическая модель, и для каких целей она используется в задачах надежности?
3. Для оценки надежности работы элемента как определяется вероятность безотказной работы?
4. Что представляет собой типичная функция интенсивности отказов?
5. В чем заключается выбор закона распределения наработки до отказа по результатам испытаний? Что представляет собой критерий согласия?
6. Какие основные законы распределения используются в теории надежности?
7. Как подчиняется вероятность появления событий в испытаниях согласно биномиальному распределению?



8. Как подчиняется вероятность появления отказов закону Пуассона?
9. Как описывается изменение плотности распределения отказов при экспоненциальном распределении до отказа?
10. Укажите расчетные выражения вероятности безотказной работы, вероятности и интенсивности отказа при экспоненциальном распределении?
11. Как рассчитывается надежность постепенных отказов на основе  $\gamma$ -распределения?
12. Охарактеризуйте расчет надежности на основе распределения Вейбулла?
13. Как рассчитывается надежность по закону нормального распределения?
14. Как проводится расчет надежности согласно распределению Рэлея?

## **Глава 4 Надежность технологических систем**

План:

- 4.1. Основы расчета надежности систем. Общие понятия.
- 4.2. Расчет надежности последовательных систем
- 4.3. Расчет надежности параллельных систем
- 4.4. Расчет надежности резервированных систем
  - 4.4.1. Способы структурного резервирования
  - 4.4.2. Нагруженный резерв
  - 4.4.3. Ненагруженный резерв
  - 4.4.4. Облегченный резерв

### **4.1. Основы расчета надежности систем.**

#### **Общие понятия**

**Задача расчета надежности:** определение показателей безотказности системы, состоящей из невосстанавливаемых элементов, по данным о надежности элементов и связях между ними.

#### **Цель расчета надежности:**

- обосновать выбор того или иного конструктивного решения;
- выяснить возможность и целесообразность резервирования;

- выяснить, достижима ли требуемая надежность при существующей технологии разработки и производства.

*Расчет надежности состоит из следующих этапов:*

1. Определение состава рассчитываемых показателей надежности.

2. Составление структурной логической схемы надежности (структуры системы), основанное на анализе функционирования системы (какие блоки включены, в чем состоит их работа, перечень свойств исправной системы и т. п.), и выбор метода расчета надежности.

3. Составление математической модели, связывающей рассчитываемые показатели системы с показателями надежности элементов.

4. Выполнение расчета, анализ полученных результатов, корректировка расчетной модели.

Состав рассчитываемых показателей надежности определяется в зависимости от системы:

Системы с невозстанавливаемыми элементами

- средняя наработка до отказа ( $T_{cp}$ );

- вероятность безотказной работы (ВБР) заданной наработке  $P(t)$ ;

- интенсивность отказов (ИО) к заданной наработке  $\lambda(t)$ ;

- плотность распределения отказов (ПРО) к заданной наработке  $f(t)$ .

Системы с восстанавливаемыми элементами

-  $T_{cp}$ ;  $P(t)$ ; коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, параметр потока отказов.

*Структура системы* – логическая схема взаимодействия элементов, определяющая работоспособность системы или иначе графическое отображение элементов системы, позволяющее однозначно определить состояние системы (работоспособное/неработоспособное) по состоянию (работоспособное/ неработоспособное) элементов.

По структуре системы могут быть:

- система без резервирования (основная система);
- системы с резервированием.

Метод повышения надежности объекта введением дополнительных элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых для нормального выполнения объектом заданных функций – **резервирование**. В этом случае отказ наступает только после отказа основного элемента и всех резервных элементов.

Для одних и тех же систем могут быть составлены различные структурные схемы надежности в зависимости от вида отказов элементов.

*Математическая модель надежности* – формальные преобразования, позволяющие получить расчетные формулы.

Модели могут быть реализованы с помощью:

- метода интегральных и дифференциальных уравнений;
- на основе графа возможных состояний системы;
- на основе логико-вероятностных методов;
- на основе дедуктивного метода (дерево отказов).

Наиболее важным этапом расчета надежности является составление структуры системы и определение показателей надежности составляющих ее элементов.

Практически расчет надежности производится в несколько этапов:

1. На стадии составления технического задания на проектируемую систему, когда ее структура не определена,

производится предварительная оценка надежности, исходя из априорной информации о надежности близких по характеру систем и надежности комплектующих элементов.

2. Составляется структурная схема с показателями надежности элементов, заданными при нормальных (номинальных) условиях эксплуатации.

3. Окончательный (коэффициентный) расчет надежности проводится на стадии завершения технического проекта, когда произведена эксплуатация опытных образцов и известны все возможные условия эксплуатации. При этом корректируются показатели надежности элементов, часто в сторону их уменьшения, вносятся изменения в структуру – выбирается резервирование.

В настоящее время оценку надежности технологических систем производят на основе методик, рекомендованных в межгосударственных стандартах **ГОСТ 27.203-83 «Общие требования к методам оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции»**, **ГОСТ 27.204-83 «Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности»**.

Системы с позиции надежности могут быть **последовательными, параллельными и комбинированными**.

**Последовательные системы** - системы с последовательным соединением элементов, когда отказ одного элемента вызывает отказ другого элемента, а затем третьего и т.д. или приводит к отказу всей системы. Наиболее наглядным примером последовательных систем могут послужить автоматические станочные линии без резервных цепей и накопителей. В них название реализуется буквально. Приводы машин и механизмы передач также рассматривают как последовательные системы. Так, если в приводе машины выйдет из строя любая шестерня, подшипник,

муфта, рычаг управления, электродвигатель, насос смазки, то весь привод перестанет функционировать.

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

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

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

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

Примером параллельных систем являются энергетические системы из электрических машин, работающих

на общую сеть, многомоторные самолеты, суда с двумя машинами и резервные системы.

Часто используют структурные схемы надежности с **параллельно-последовательным** соединением элементов – **комбинированные системы**. Примерами комбинированных систем являются системы с радиоэлектронными элементами, применяющие схемы, работающие по принципу два из трех, когда работоспособность обеспечивается благодаря исправному состоянию любых двух элементов.

#### 4.2. Расчет надежности последовательных систем

Рассмотрим надежность простейшей расчетной модели системы из последовательно соединенных элементов (рис. 4.1).

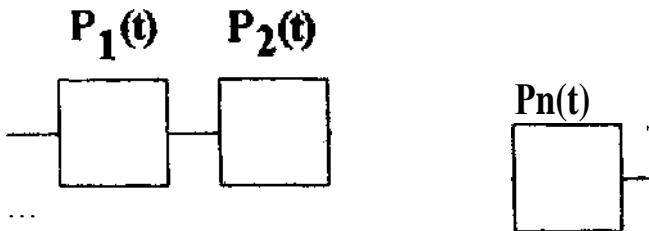


Рис 4.1. Последовательная система

Используем теорему умножения вероятностей, согласно которой вероятность совместного проявления независимых событий, равна произведению вероятностей этих событий.

Если система состоит из  $n$  элементов и элементы входящие в состав системы, являются независимыми то, вероятность безотказной работы системы определяется как произведение вероятностей безотказной работы составляющих ее элементов.

$$P_c(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_n(t) \quad (4.1)$$

Если

$$P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_n(t)$$

то (4.1) преобразуется к виду:

$$P_c(t) = P_1^n(t)$$

Надежность смежных последовательных систем получается низкая. Например, если система состоит из 10 элементов с вероятностью безотказной работы 0,9, то общая вероятность составит  $0,9^{10} \approx 0,35$ .

### 4.3. Расчет надежности параллельных систем

В системе с параллельным соединением элементов представляет интерес знание вероятности безотказной работы всей системы, т.е. всех ее элементов, 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. Рассматривают бином

$$[P(t) + Q(t)]^m \quad (4.2)$$

где показатель степени  $m$  равен 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:

$$\begin{aligned} (P+Q)^2 &= P^2 + 2PQ + Q^2 = 1 \\ (P+Q)^3 &= P^3 + 3P^2Q + 3PQ^2 + Q^3 = 1, \\ (P+Q)^4 &= P^4 + 4P^3Q + 6P^2Q^2 + 4PQ^3 + Q^4 = 1 \end{aligned} \quad (4.3)$$

В уравнениях (4.3) 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.

Надежность системы из последовательно соединенных элементов, подчиняющихся распределению Вейбулла:

$$P_1(t) = \exp\left(-\frac{t^{m_1}}{t_{0_1}}\right) \text{ и } P_2(t) = \exp\left(-\frac{t^{m_2}}{t_{0_2}}\right), \quad (4.4)$$

$$\text{или } P(t) = \exp\left(-\frac{t^{m_1}}{t_{0_1}}\right),$$

где: параметры  $m$  и  $t$  являются довольно сложными функциями аргументов  $m_1, m_2, t_{0_1}, t_{0_2}$ .

Методом статистического моделирования (Монте-Карло) на ЭВМ строят графики для практических расчетов. Графики позволяют определить средний ресурс (до первого отказа) системы из двух элементов в долях от среднего ресурса элемента большей долговечности и коэффициента вариации для системы в зависимости от отклонения средних ресурсов и коэффициентов вариации элементов.

Для системы из трех элементов и более можно пользоваться графиками последовательно, причем удобно их применять для элементов в порядке возрастания их среднего ресурса.

#### **4.4. Расчет надежности резервированных систем**

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

**Резервирование** – метод повышения надежности изделий (систем), путем применения структурной, функ-



циональной, информационной или временной избыточности по отношению к минимально необходимой и достаточной для выполнения изделиями (системами) заданных функций.

**Система с резервированием** – это система с избыточностью элементов, т. е. с резервными составляющими, избыточными по отношению к минимально необходимой (основной) структуре и выполняющими те же функции, что и основные элементы.

Систему можно представить из ряда ступеней, выполняющих отдельные функции. Задача резервирования состоит в нахождении такого числа резервных образцов оборудования на каждой ступени, которое будет обеспечивать заданный уровень надежности системы при наименьшей стоимости.

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

**Основной элемент** - элемент основной физической структуры объекта, минимально необходимой для нормального выполнения объектом его задач.

**Резервный элемент** - элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

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

**По виду резервирование** делится на: структурное, функциональное, временное, информационное, нагрузочное.

**Структурное (элементное) резервирование** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта. Обеспечивается подключением

к основной аппаратуре резервной таким образом, чтобы при отказе основной аппаратуры резервная продолжала выполнять ее функции.

**Резервирование функциональное** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных и наряду с ними.

**Временное резервирование** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточного времени, выделенного для выполнения задач. Другими словами, временное резервирование - такое планирование работы системы, при котором создается резерв рабочего времени для выполнения заданных функций. Резервное время может быть использовано для повторения операции, либо для устранения неисправности объекта.

**Информационное резервирование** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения задач.

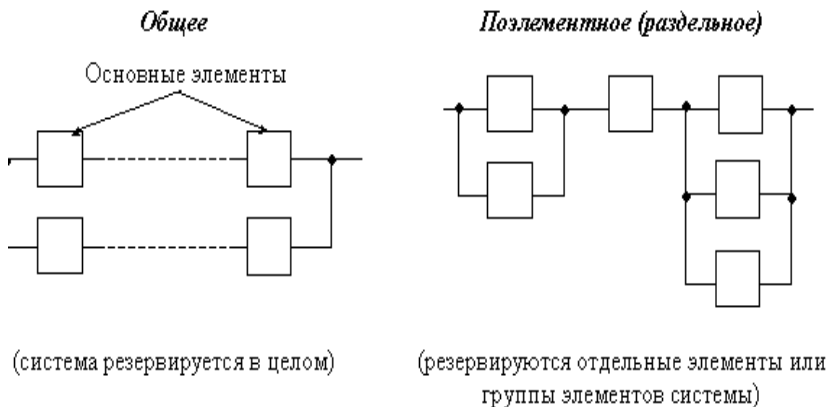
**Нагрузочное резервирование** - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности его элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных.

Резервирование подразделяют на:

- **пассивное (нагруженное)** – резервные элементы функционируют наравне с основными (постоянно включены в работу);
- **активное (ненагруженное)** – резервные элементы вводятся в работу только после отказа основных элементов (резервирование замещением).

С позиций расчета и обеспечения надежности технических систем необходимо рассматривать структурное резервирование.

Структурное резервирование может быть:



#### 4.4.1 Способы структурного резервирования

По способу подключения резервных элементов и устройств различают следующие способы резервирования (рис. 4.3):

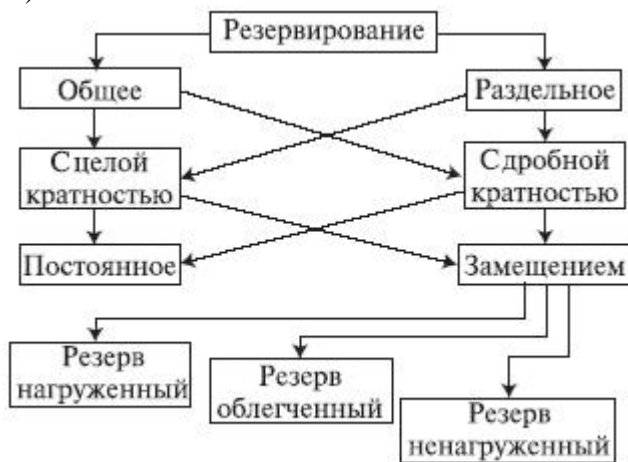


Рис. 4.3 Способы структурного резервирования

***Резервирование раздельное (поэлементное) с постоянным включением резервных элементов*** (рис. 4.4).

Такое резервирование возможно тогда, когда подключение резервного элемента не существенно изменяет

рабочий режим устройства. Достоинство его - постоянная готовность резервного элемента, отсутствие затраты времени на переключение. Недостаток - резервный элемент расходует свой ресурс так же, как основной элемент.

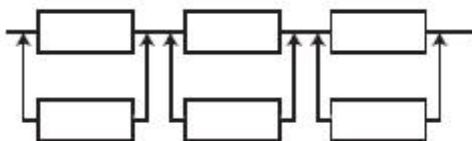


Рис. 4.4 Резервирование раздельное с постоянным включением резервных элементов

*Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента одним резервным элементом* (рис. 4.5). Это такой способ резервирования, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

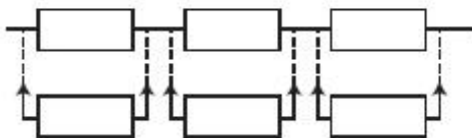


Рис. 4.5 Резервирование раздельное с замещением отказавшего

В этом случае резервный элемент находится в разной степени готовности к замене основного элемента. Достоинство этого способа - резервный элемент сохраняет свой рабочий ресурс, либо может быть использован для выполнения самостоятельной задачи. Рабочий режим основного устройства не искажается. Недостаток - необходимость затрачивать время на подключение резервного элемента. Резервных элементов может быть меньше, чем основных.

Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых называется **кратностью резервирования - m**. При резервировании с целой кратностью величина m есть целое число, при резервировании с дробной кратностью - дробное.

стью величина  $m$  есть дробное несокращаемое число. Например,  $m=4/2$  означает наличие резервирования с дробной кратностью, при котором число резервных элементов равно четырем, число основных - двум, а общее число элементов равно шести. Сокращать дробь нельзя, так как если  $m=4/2=2/1$ , то это означает, что имеет место резервирование с целой кратностью, при котором число резервных элементов равно двум, а общее число элементов равно трем.

При включении резерва по способу замещения резервные элементы до момента включения в работу могут находиться в трех состояниях:

- нагруженном резерве;
- облегченном резерве;
- ненагруженном резерве.

**Нагруженный резерв** - резервный элемент, находящийся в том же режиме, что и основной.

**Облегченный резерв** - резервный элемент, находящийся в менее нагруженном режиме, чем основной.

**Ненагруженный резерв** - резервный элемент, практически не несущий нагрузку.

*Резервирование общее с постоянным подключением, либо с замещением* (рис. 4.6). В этом случае резервируется объект в целом, а в качестве резервного - используется аналогичное сложное устройство. Этот способ менее экономичен, чем раздельное резервирование. При отказе, например, первого основного элемента возникает необходимость подключать всю технологическую резервную цепочку.

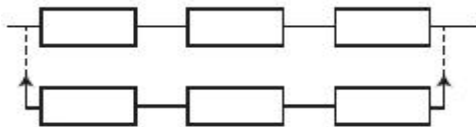


Рис. 4.6 Резервирование общее

**Резервирование мажоритарное** ("голосование"  $n$  из  $m$  элементов) (рис. 4.7). Этот способ основан на применении дополнительного элемента - его называют мажоритарный или логический или кворум-элемент. Он позволяет вести сравнение сигналов, поступающих от элементов, выполняющих одну и ту же функцию. Если результаты совпадают, тогда они передаются на выход устройства. На рис. 4.7 изображено резервирование по принципу голосования "два из трех", т.е. любые два совпадающих результата из трех считаются истинными и проходят на выход устройства. Можно применять соотношения три из пяти и др. Главное достоинство этого способа - обеспечение повышения надежности при любых видах отказов работающих элементов. Любой вид одиночного отказа элемента не окажет влияния на выходной результат.

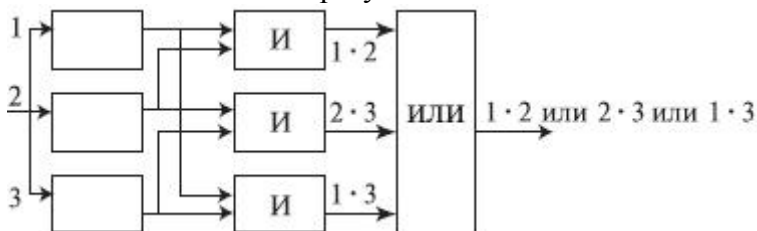


Рис. 4.7 Резервирование мажоритарное

#### 4.4.2. Нагруженный резерв

**Нагруженный резерв** - резервные элементы находятся в том же режиме, что и основной элемент, их надежность не зависит от того, в какой момент они включились на место основного. При нагруженном резервировании резервные элементы или цепи подключены параллельно основным (рис. 4.8).

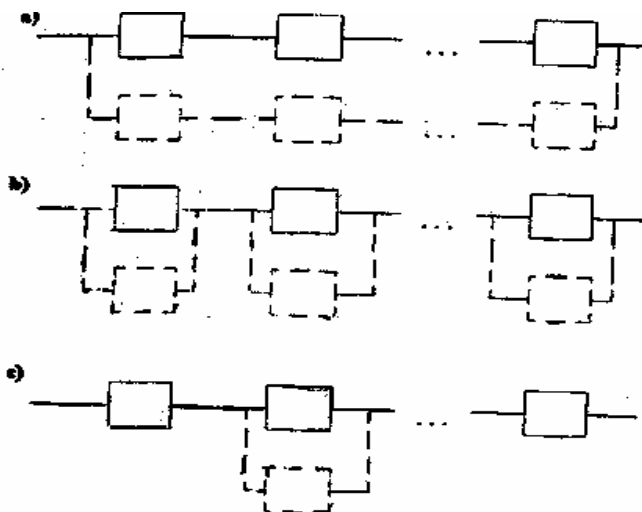


Рис. 4.8 Системы а) – с общим; б) с поэлементным; в) с частичным резервированием.

При нагруженном резервировании резервные элементы расходуют свой ресурс, имеют одинаковое распределение наработок до отказа и интенсивность отказов основных  $\lambda_o$  и резервных  $\lambda_{ч}$  элементов одинакова ( $\lambda_o = \lambda_{ч}$ ).

При нагруженном резервировании различие между основными и резервными элементами часто условное. Для обеспечения нормальной работы (сохранения работоспособности) необходимо, чтобы число работоспособных элементов не становилось меньше минимально необходимого.

Вероятность отказа всех элементов:

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

где:  $Q_i(t)$  ~ вероятность отказа  $i$ -го элемента.

Вероятность безотказной работы  $P_c(t) = 1 - Q_c(t)$ .

Если элементы одинаковы, то  $Q(t) = Q_1^n(t)$  и  $P_c = 1 - Q^n(t)$ .

Например, если  $Q_1 = 0,01$  и  $n = 2$  (дублирование), то  $P_c = 0,9999$ , если же  $Q_1 = 0,01$  и  $n = 3$  (двойное резервирование), то  $P_c = 0,999999$ .

Если в системе «а» элементов не дублированы, а «b» элементов дублированы, то надежность системы:

$$P_c(t) = P_a(t) \cdot P_b(t)$$

$$P_a(t) = \prod_{i=1}^a P_i(t)$$

$$P_b(t) = \prod_{i=1}^b P_i(t)$$

Среднее время работы резервной группы определяется из формулы:

$$T = \int_0^{\infty} P_c(t) dt \quad (4.6)$$

Если надежность элементов задана аналитически, то среднее время во многих случаях вычисляется в конечном виде.

#### 4.4.3. Ненагруженный резерв

**Ненагруженный резерв** - резервные элементы находятся в выключенном состоянии и по условию до момента их включения на место основного не могут отказать (резервные элементы, практически не несут нагрузки, включаются только при отказе основных, причем считается, что пребывание в нерабочем состоянии не изменяет их надежности в рабочем состоянии).

При ненагруженном резервировании резервные элементы не подвергаются нагрузке, их показатели надежности не изменяются и они не могут отказать за время нахождения в резерве, т. е. интенсивность отказов резервных элементов  $\lambda_x = 0$ .

Примеры ненагруженного резервирования представлены на рисунке 4.9:



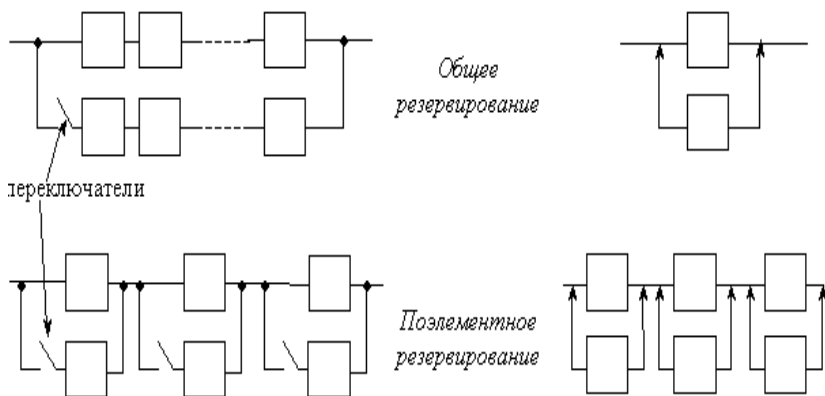


Рис. 4.9 Примеры ненагруженного резервирования

Резервные элементы включаются в работу только после отказа основных элементов. Переключение производится вручную или автоматически (автоматически – включение резервных машин и элементов в энергетике, в бортовых сетях судов и самолетов и т. д.; вручную – замена инструмента или оснастки при производстве, включение эскалаторов в метро в часы «пик» и т. д.).

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

#### 4.4.4. Облегченный резерв

Разновидностью нагруженного резервирования является **резервирование с облегченным резервом**, т. е. резервные элементы также находятся под нагрузкой, но меньшей, чем основные. Интенсивность отказов резервных элементов  $\lambda_{об}$  ниже, чем у основных  $\lambda_0$ , т. е.  $\lambda_0 > \lambda_{об}$ .

Во время ожидания в резерве они могут отказать, но с вероятностью меньшей, чем вероятность отказа основного элемента.

Во многих случаях невыгодно применять нагруженный резерв, так как из-за отказов резервных элементов он не дает желаемого выигрыша в надежности. Ненагруженный резерв более эффективен, чем нагруженный, и количественно показатели эффективности зависят от законов распределения наработки до отказа отдельных элементов резервированной системы.

Основным моментом, который может сказаться на оценке надежности является то, что предположение  $\lambda = const$  является довольно условным, поскольку, особенно при отсутствии технического обслуживания, очередной работающий элемент эксплуатируется до полного износа (физически  $\lambda$  должна возрастать). Поэтому принятое экспоненциальное распределение наработки элементов, переходящих из резервных в рабочие, использовалось только с целью упрощения расчетов.

Ненагруженный резерв в рамках принятых допущений не всегда осуществим. Например, в авиа- и судовых системах как основные, так и резервные элементы подвержены вибрации, ударам, повторно-статическим нагрузкам, перепадам температур и т. п. Поэтому не включенные в работу резервные элементы будут иметь некоторую  $\lambda \neq 0$ , то есть они также изнашиваются, но менее интенсивно.

Поэтому, в ряде практических случаев, уместно применять облегченный резерв:

- подключение резервных элементов к цепям питания для прогрева и удержания требуемых значений параметров;

- внешние нагрузки и воздействия, приводящие к изменению свойств материалов, рабочих параметров и т. п.

При этом, резервные элементы будут иметь некоторую интенсивность отказов  $\lambda_r \neq 0$ .

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 и в рабочем и в нерабочем состоянии подчиняются экспоненциальному закону, а надежность элемента в рабочем состоянии не зависит от времени пребывания в нерабочем состоянии. Вероятность безотказной работы будет рассчитываться по формуле:

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_1) \cdot \dots \cdot (\lambda + (n-1)\lambda_1)}{n!} \cdot t \quad (4.8)$$

Здесь  $\lambda$  - интенсивность отказов работающих элементов;  $\lambda_1$  - интенсивность отказов элементов, работающих в облегченном режиме.

При простом дублировании формула (4.8) принимает вид:

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

при двух резервных элементах:

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_1)(\lambda + 2\lambda_1)}{3!} \cdot t$$

**Контрольные вопросы:**

1. Основные цели и задачи расчета показателей надежности систем?
2. Определите состав рассчитываемых показателей безотказности системы?
3. Перечислите и поясните основные этапы расчета надежности систем?
4. Что такое структура надежности?
5. Что такое математическая модель расчета надежности?
6. Как выполняется расчет надежности последовательных систем?

7. Дайте характеристику методике расчета надежности параллельных систем.
8. Какие виды резервирования существуют?
9. В чем отличие нагруженного и ненагруженного резервирования?
10. Опишите методику расчета надежности резервированных систем, с нагруженным резервом.
11. Как рассчитывается надежность систем с ненагруженным и облегченным резервом?

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**Таблица значений функции  $y = \exp(-x)$**

x	y	x	y	x	y	x	y
0,00	1,000	0,40	0,670	0,80	0,449	3,00	0,050
0,01	0,990	0,41	0,664	0,81	0,445	3,10	0,045
0,02	0,980	0,42	0,657	0,82	0,440	3,20	0,041
0,04	0,961	0,44	0,644	0,84	0,432	3,40	0,033
0,06	0,942	0,46	0,631	0,86	0,423	3,60	0,027
0,08	0,923	0,48	0,619	0,88	0,415	3,80	0,022
0,10	0,905	0,50	0,606	0,90	0,407	4,00	0,0183
0,12	0,887	0,52	0,595	0,92	0,399	4,20	0,0150
0,14	0,869	0,54	0,583	0,94	0,391	4,40	0,0123
0,16	0,852	0,56	0,571	0,96	0,383	4,60	0,0101
0,18	0,835	0,58	0,560	0,98	0,375	4,80	0,0082
0,20	0,819	0,60	0,549	1,00	0,368	5,00	0,0067
0,22	0,803	0,62	0,538	1,20	0,302	5,20	0,0055
0,24	0,787	0,64	0,527	1,40	0,247	5,40	0,0045
0,26	0,771	0,66	0,517	1,60	0,202	5,60	0,0037
0,28	0,756	0,68	0,507	1,80	0,165	5,80	0,0030
0,30	0,741	0,70	0,497	2,00	0,135	6,00	0,0025
0,32	0,726	0,72	0,487	2,20	0,111	6,20	0,0020
0,34	0,712	0,74	0,477	2,40	0,091	6,40	0,0017
0,36	0,698	0,76	0,468	2,60	0,074	6,60	0,0014
0,38	0,684	0,78	0,458	2,80	0,061	6,80	0,0011
0,40	0,670	0,80	0,449	3,00	0,050	7,00	0,0009

**Примечание.** Для  $x < 0,01$  можно принимать  $y = \exp(-x) \approx 1 - x$ .

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**  
**Значения гамма-функций**

$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,919906
1,01	0,99433	1,26	0,90440	1,51	0,88659	1,76	0,92137
1,02	0,98884	1,27	0,90250	1,52	0,88704	1,77	0,92376
1,03	0,98355	1,28	0,90072	1,53	0,88757	1,78	0,92623
1,04	0,97844	1,29	0,89904	1,54	0,88818	1,79	0,92877
1,05	0,97350	1,30	0,89747	1,55	0,88887	1,80	0,93188
1,06	0,96874	1,31	0,89600	1,56	0,88964	1,81	0,93408
1,07	0,96415	1,32	0,89464	1,57	0,89049	1,82	0,93685
1,08	0,95973	1,33	0,89338	1,58	0,89142	1,83	0,93369
1,09	0,95546	1,34	0,89222	1,59	0,89243	1,84	0,94261
1,10	0,95135	1,35	0,89115	1,60	0,89352	1,85	0,94561
1,11	0,94740	1,36	0,89018	1,61	0,89468	1,86	0,94869
1,12	0,94359	1,37	0,88931	1,62	0,89592	1,87	0,95184
1,13	0,93993	1,38	0,88854	1,63	0,89724	1,88	0,95507
1,14	0,93642	1,39	0,88785	1,64	0,89864	1,89	0,95838
1,15	0,93304	1,40	0,88726	1,65	0,90012	1,90	0,96177
1,16	0,92980	1,41	0,88676	1,66	0,90167	1,91	0,96523
1,17	0,92670	1,42	0,88636	1,67	0,90330	1,92	0,96877
1,18	0,92373	1,43	0,88604	1,68	0,90500	1,93	0,97240
1,19	0,92089	1,44	0,88581	1,69	0,90678	1,94	0,97610
1,20	0,91817	1,45	0,88566	1,70	0,90864	1,95	0,97988
1,21	0,91558	1,46	0,88560	1,71	0,91057	1,96	0,98374
1,22	0,91311	1,47	0,88563	1,72	0,91258	1,97	0,98768
1,23	0,91075	1,48	0,88575	1,73	0,91467	1,98	0,99171
1,24	0,90852	1,49	0,88595	1,74	0,91683	1,99	0,99581
						2,00	1,00000

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Значение нормальной функции распределения

$$F(t) = 0,5 + \Phi(u)$$

<i>u</i>	<i>F(t)</i>	<i>u</i>	<i>F(t)</i>	<i>u</i>	<i>F(t)</i>
-0,00	0,500	-1,60	0,055	0,80	0,788
-0,10	0,460	-1,70	0,044	0,90	0,816
-0,20	0,420	-1,80	0,036	1,00	0,841
-0,30	0,382	-2,00	0,023	1,20	0,885
-0,40	0,344	-2,20	0,014	1,30	0,903
-0,50	0,308	-2,40	0,008	1,40	0,919
-0,60	0,274	-2,60	0,005	1,50	0,933
-0,70	0,242	-2,80	0,003	1,60	0,945
-0,80	0,212	-3,00	0,001	1,70	0,955
-0,90	0,184	0,10	0,540	1,80	0,964
-1,00	0,159	0,20	0,579	2,00	0,977
-1,10	0,136	0,30	0,618	2,20	0,986
-1,20	0,115	0,40	0,655	2,40	0,992
-1,30	0,097	0,50	0,691	2,60	0,995
-1,40	0,080	0,60	0,726	2,80	0,997
-1,50	0,067	0,70	0,758	3,00	0,999

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Значение функций $f(x)$

$x$		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	0,	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714	5753
0,2	0,	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
0,4	0,	6551	6594	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
0,6	0,	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517	7549
0,8	0,	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133
1,0	0,	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8621
1,2	0,	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997	9015
1,4	0,9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056	3189
1,6	0,9	4520	4630	4738	4855	4950	5053	5154	5254	5352	5449
1,8	0,9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995	7062
2,0	0,9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124	8169
2,1	0,9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537	8574
2,2	0,9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870	8899
2,4	0,99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431	3613
2,6	0,99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6319	6427
2,8	0,99	7445	7523	7599	7673	7744	7814	7882	7948	8012	8074
3,0	0,99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965	8999
3,1	0,999	0324	0646	0957	1260	1553	1836	2112	2378	2636	2886
3,2	0,999	3129	3363	3590	3810	4022	4230	4429	4623	4810	4991
3,4	0,999	6631	6752	6869	6982	7091	7197	7299	7398	7493	7585
3,6	0,999	8409	8469	8527	8583	8637	8689	8739	8787	8834	8879
3,8	0,9999	2765	3052	3327	3593	3848	4094	4331	4558	4777	4988
4,0	0,9999	6833	6964	7090	7211	7327	7439	7546	7649	7748	7843
4,2	0,9999	8665	8723	8778	8832	8882	8931	8978	9023	9066	9107
5,0	0,999999	7134	—	—	—	—	—	—	—	—	—

**Примечание.** При  $x \geq 4$  значения  $F(x)$  можно принимать  $\approx 1$ .



## ЛИТЕРАТУРА:

1. Груман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов./ Груман В.Е. – 9-е изд. – М.Высш. шк. 2003.- 479с.
2. Надежность технических систем. Справочник. Ю.К.Беляев, В.А. Богатырев, В.В.Болотин и др.; Под ред. И.А.Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985.-608.
3. ТимофееваС.С. Надежность технических систем и техногенный риск. Учеб. Пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. – 2003-290с.
4. Ветошкин А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск. Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003
5. Надежность технических систем и техногенный риск. Электронное пособие. <http://www.obzh.ru/nad/4.html>
6. Колобов А.Б. Надежность технических систем. Ивановский государственный энергетический университет.
7. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».
8. ГОСТ 27.003-90 «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности».
9. ГОСТ 27.001-95 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СИСТЕМА СТАНДАРТОВ " Надежность в технике ".
10. ГОСТ 27.301-95 «Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения».
11. ГОСТ 27.202-83 «Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции»
12. ГОСТ 27.310-95 «Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.»
13. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов РД 03-418-01
14. Графкина М.В., Михайлов В.А., Нюнин Б.И. Безопасность жизнедеятельности: учебник/ под общ. ред. Б.Н. Нюнина.- М.: Велби, изд-во Проспект, 2007.- С. 608
15. ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 1 1.1 1.94 г..
16. ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 №116-ФЗ.
17. ФЗ О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.99 г. №52-ФЗ.
18. ФЗ "Об охране окружающей среды" от 10.01.02 г. №7-ФЗ.

# Оглавление

Введение

3

## Глава 1 Основные понятия надежности

1.1. История развития теории надежности. Стандартизация в области надежности.

1.2. Основные термины и понятия надежности

1.3. Состояние объекта

1.4. Дефекты, повреждения, отказы

1.5. Временные понятия надежности

1.6. Техническое обслуживание и ремонт

## Глава 2 Показатели надежности, безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости

2.1 Показатели надежности

2.2 Показатели безотказности

2.3. Показатели долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости

2.4. Комплексные показатели надежности

## Глава 3 Основные теории расчета надежности технических систем

3.1. Теоретические законы распределения отказов

3.2 Статистическая обработка результатов испытаний и определение показателей надежности

3.3 Основные законы распределения, используемые в теории надежности

3.3.1 Биноминальный закон

3.3.2 Закон Пуассона

3.3.3 Экспоненциальный закон

3.3.4 Гамма-распределение

3.3.5 Распределение Вейбулла

3.3.6 Нормальное распределение

3.3.7 Усеченное нормальное распределение

3.3.8 Логарифмически нормальное (логнормальное) распределение

3.3.9 Распределение Рэлея

3.4 О выборе закона распределения отказов при расчете надежности

## Глава 4 Надежность технологических систем

4.1. Основы расчета надежности систем. Общие понятия.

4.2. Расчет надежности последовательных систем

4.3. Расчет надежности параллельных систем

4.4. Расчет надежности резервированных систем

4.4.1. Способы структурного резервирования

4.4.2. Нагруженный резерв

4.4.3. Ненагруженный резерв

4.4.4. Облегченный резерв