

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
**Бийский технологический институт (филиал)**  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова»

**А.М. Третьяков**

## **ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ**

Допущено научно-методическим советом БТИ АлтГТУ  
для внутреннего использования в качестве  
учебного пособия для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки бакалавров  
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин  
и комплексов» (профиль подготовки «Автомобильный сервис»)

Бийск  
Издательство Алтайского государственного технического  
университета им. И.И. Ползунова  
2016

УДК 656(075.8)

Т66

Рецензенты: В.А. Беляев, к. т. н., доцент кафедры  
РДВУАС БТИ АлтГТУ;  
В.В. Майоров, директор ООО «ЕвроДизельБийск-2005»

**Третьяков, А.М.**

Т66 Основы теории надежности: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профиль подготовки «Автомобильный сервис») / А.М. Третьяков; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2016. – 106 с.

В учебном пособии рассматриваются вопросы надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых, нерезервированных и резервированных систем. Особое внимание уделяется методам повышения надежности и испытаниям на надежность.

Учебное пособие может быть использовано при изучении дисциплин «Основы теории надежности», «Основы работоспособности технических систем» студентами, обучающимися по направлению подготовки бакалавров 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов (профиль подготовки «Автомобильный сервис»).

УДК 656(075.8)

Рассмотрено и одобрено на заседании научно-методического совета  
Бийского технологического института  
Протокол № 1 от 21.10.2015 г.

© Третьяков А.М., 2016

© БТИ АлтГТУ, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ПРОБЛЕМА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	6
1.1 Актуальность проблемы надежности .....	6
1.2 История развития теории надежности .....	7
1.3 Предмет науки о надежности .....	9
Контрольные вопросы .....	11
2 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	12
2.1 Система стандартов «Надежность в технике» .....	12
2.2 Основные понятия, термины и определения .....	12
2.3 Система и ее элементы .....	14
2.4 Состояния и события перехода .....	16
2.5 Надежность и эффективность .....	20
Контрольные вопросы .....	22
3 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПРОЦЕССАХ .....	23
3.1 Случайные события и их потоки .....	23
3.2 Случайные величины .....	24
3.3 Характеристики положения случайной величины .....	27
3.4 Законы распределения случайных величин .....	29
3.5 Случайные процессы .....	34
Контрольные вопросы .....	37
4 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОТКАЗОВ .....	38
4.1 Источники и причины изменения выходных параметров объектов .....	38
4.2 Виды повреждений объектов .....	39
4.3 Изменение интенсивности потока отказов в период эксплуатации .....	41
Контрольные вопросы .....	42
5 ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ .....	43
5.1 Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов .....	44
5.2 Показатели безотказности восстанавливаемых объектов .....	48
5.3 Показатели долговечности и сохраняемости .....	49
5.4 Показатели ремонтпригодности .....	51
5.5 Комплексные показатели надежности .....	53
Контрольные вопросы .....	54
6 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ .....	55
6.1 Системы как объект надежности и их основные свойства .....	55
6.2 Надежность невосстанавливаемых объектов .....	62
6.3 Надежность восстанавливаемых объектов .....	66
Контрольные вопросы .....	70

7 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ.....	71
7.1 Факторы, влияющие на надежность объектов .....	71
7.2 Резервирование объектов .....	73
7.3 Постоянное структурное резервирование без восстановления.....	76
7.4 Резервирование замещением .....	79
7.5 Скользящее резервирование .....	81
7.6 Проблемы создания высоконадежных систем .....	83
Контрольные вопросы .....	88
8 ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ .....	89
8.1 Значение и виды испытаний на надежность.....	89
8.2 Определительные испытания.....	93
8.3 Ускоренные испытания .....	97
Контрольные вопросы .....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	104
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	105

## ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс связан с созданием сложной, совершенной техники, с постоянным повышением требований к ее характеристикам, с необходимостью объединять в единые комплексы самые разнообразные технические устройства. Это ведет к возникновению новых научно-технических проблем, разрешение которых является необходимым условием для дальнейшего развития производительных сил общества. Одной из основных проблем машиностроения является проблема надежности.

Важнейшей задачей развития экономики является постоянное повышение качества выпускаемой продукции и эффективности ее использования. Качество продукции технического назначения и эффективность ее использования во многом определяются уровнем ее надежности, т. е. способностью выполнять заданные функции в расчетных условиях эксплуатации в течение достаточно продолжительного периода времени.

Требуемый уровень надежности закладывается при проектировании, обеспечивается в процессе изготовления, монтажа и поддерживается на стадии эксплуатации.

Создание сложных технических устройств и комплексов, особенно в составе подвижных объектов, таких как автомобили, самолеты, суда и т. п., выдвинуло на первый план требование существенного уменьшения их габаритов и массы при одновременном повышении уровня надежности, что диктуется не только экономическими ограничениями, но и необходимостью обеспечения безопасности эксплуатации.

Для комплексного решения возникших при этом проблем потребовалась разработка основ нового научного направления – теории надежности.

# 1 ПРОБЛЕМА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## 1.1 Актуальность проблемы надежности

Для современных машин характерны увеличение степени автоматизации, повышение рабочих параметров – нагрузок, скоростей, температур, борьба за малые габариты и массу, повышение требований к точности функционирования, к эффективности их работы (производительности, мощности, КПД), объединение машин в системы с единым управлением. Усложнение машин и ужесточение требований к ним обуславливают необходимость повышения их надежности.

Надежность отражает свойство машины сохранять требуемые качественные показатели в течение всего периода эксплуатации.

Решение проблемы надежности техники – это огромный резерв повышения эффективности производства, производительности общественного труда.

Ненадежная машина не может эффективно функционировать, т. к. каждая ее остановка из-за повреждения отдельных элементов или снижения технических характеристик ниже допустимого уровня, как правило, влечет за собой большие материальные убытки, а в отдельных случаях может иметь катастрофические последствия.

В настоящее время промышленность даже передовых стран несет большие потери из-за недостаточной надежности выпускаемых машин. Так, за весь период эксплуатации затраты на ремонт и техническое обслуживание машин в связи с их износом в несколько раз превышают стоимость новой машины, например, для автомобилей – до 6 раз, для самолетов – до 5 раз, для станков – до 8 раз, для радиотехнической аппаратуры – до 12 раз. Из-за коррозии ежегодно теряется до 10 % выплавляемого металла.

Существенное недоиспользование потенциальных возможностей имеет место для машин и агрегатов, к которым предъявляются высокие требования безотказности. Они, как правило, снимаются с эксплуатации намного раньше того срока службы, который могло бы отработать большинство этих изделий.

С особенно большими затратами времени и средств связан выход из строя уникальных машин и агрегатов, таких как мощные турбины, доменные печи, тяжелые краны и др.

Но могут быть и такие последствия ненадежности изделий, которые нельзя оценить никакими экономическими показателями. Это гибель людей в результате катастроф, отказы военной техники в ответственные моменты.

## 1.2 История развития теории надежности

Исторически наука о надежности развивалась по двум основным направлениям:

– *математическое* направление возникло в радиоэлектронике и связано с развитием математических методов оценки надежности, особенно применительно к сложным системам, с разработкой методов статистической обработки информации о надежности, разработкой структур систем, обеспечивающих высокий уровень надежности.

Теоретической базой этого направления являются: теория вероятностей, математическая статистика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, математическое моделирование и другие разделы математики;

– *физическое* направление возникло в машиностроении и связано с изучением физики отказов, с разработкой методов расчета на прочность, износостойкость, теплостойкость и др.

Теоретической базой этого направления являются естественные и технические науки, изучающие различные аспекты разрушения, старения и изменения свойств материалов: теории упругости, пластичности и ползучести, теория усталостной прочности, механика разрушения, трибология, физико-химическая механика материалов и др.

Сегодня идет активный процесс слияния этих направлений и формирование на этой основе единой науки о надежности.

Долгое время надежность не измерялась количественно, что значительно затрудняло ее объективную оценку: использовались такие понятия, как *высокая* (*низкая*) надежность и другие качественные определения.

В нашей стране проблема надежности машин впервые была выдвинута на сессии Академии наук СССР в 1934 г.

На первых этапах развития теории надежности основное внимание сосредотачивалось на сборе и обработке статистических данных об отказах изделий. В оценке надежности преобладал характер констатации количественных характеристик потока отказов на основании статистических данных.

Вместе с тем возникали новые направления исследований, связанные с поиском принципиально новых способов повышения надежности, прогнозированием отказов и показателей надежности, анализом физико-химических процессов, оказывающих влияние на надежность, установлением корреляционных связей между характеристиками этих процессов и показателями надежности, совершенствованием методов расчета показателей надежности.

Испытания на надежность совершенствовались главным образом в направлении проведения ускоренных и неразрушающих испытаний. Наряду с совершенствованием натурных испытаний широкое распространение получило математическое моделирование. В результате к середине XX-го века сформировались основы общей теории надежности.

Увеличивающаяся сложность технических устройств, возрастающая ответственность функций, выполняемых техническими системами, повышение требований к качеству изделий и условиям их работы, возросшая роль автоматизации управления техническими объектами – основные факторы, определившие главное направление в развитии науки о надежности. (Если не принимать специальных мер по обеспечению надежности, то любая современная машина практически окажется неработоспособной.)

Круг вопросов, входящих в компетенцию теории надежности, сформулировал акад. А.И. Берг: *«Теория надежности устанавливает закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности системы и ее элементов, рассматривает влияние внешних и внутренних воздействий на процессы в системах, создает основы расчета надежности и предсказания отказов, изыскивает способы повышения надежности (при конструировании и изготовлении систем и их элементов, а также способы сохранения надежности при эксплуатации)».*

Можно выделить несколько этапов развития теории надежности.

1. **Начальный этап.** Он начинается с массовым появлением технических устройств (конец XIX века) и заканчивается с широким распространением электроники и автоматики, реактивной авиации и ракетно-космической техники (середина XX века).

С усложнением техники в начале XX века остро встала проблема обеспечения безотказности и долговечности. Основой для решения этой проблемы стала теория вероятностей и математическая статистика.

С началом развития авиации и применения в ней электроники и автоматики начинает формироваться новая техническая дисциплина – теория надежности.

2. **Этап становления теории надежности (1950–60).** В 1950 г. военно-воздушные силы США организовали первую группу для изучения проблем надежности радиоэлектронного оборудования. Эта группа установила, что основная причина отказов радиоэлектронной аппаратуры заключалась в низкой надежности элементов. Были определены пути решения этой проблемы, в частности, разработка эффективных



методов повышения надежности; изучение влияния различных факторов на отказы элементов. Собранный обширный статистический материал послужил основой существенного вклада в теорию надежности.

3. *Этап классической теории надежности* (1960–70). В этот период активно развивается космическая техника, требующая повышенной надежности.

Начинает развиваться теория диагностики сложных систем. Появляются новые стандарты по надежности машин.

4. *Этап системных методов надежности* (с 1970 г.). На этом этапе были разработаны новые требования к надежности, заложившие основу современных систем и программ обеспечения надежности. Были разработаны типовые методики проведения мероприятий, связанных с обеспечением надежности. Эти методики разделяются на два основных направления:

– первое относится к потенциальной надежности, которое учитывает конструктивные (выбор материала, запас прочности и т. д.) и технологические (ужесточение допусков, повышение чистоты поверхности и т. д.) методы обеспечения надежности;

– второе направление – эксплуатационное, которое направлено на обеспечение эксплуатационной надежности (стабилизация условий эксплуатации, совершенствование методов ТО и ремонта и т. д.).

### **1.3 Предмет науки о надежности**

Первичным по отношению к понятию «надежность» является понятие «качество». Качество объекта – совокупность свойств и признаков, определяющих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением и выражающих его специфику и отличие от других объектов.

Но поскольку этап применения (эксплуатация) объекта охватывает, как правило, длительный период времени, под влиянием различных факторов может произойти изменение свойств, определяющих качество объекта и эффективность его функционирования, под которой понимается выгодность целевого обмена ресурсов (материальных, энергетических, трудовых, информационных) на конечный результат (для транспортных средств – объем перевозок, для технологических систем – готовая продукция и т. д.).

Предметом науки о надежности является изучение закономерностей изменения показателей качества объектов во времени и разработка методов, позволяющих с минимальной затратой (времени

и ресурсов) обеспечить необходимую продолжительность и эффективность их работы.

Изменение показателей качества объекта во времени может быть абсолютным и относительным.

**Абсолютное** изменение качества связано с различными повреждающими процессами, действующими на объект при эксплуатации и изменяющими свойства и состояние материалов, из которых изготовлен объект; за счет этого происходит прогрессивное снижение показателей качества объекта и его физическое старение (физический износ).

**Относительное** изменение качества связано с появлением новых аналогичных объектов с более совершенными характеристиками, в связи с чем показатели данного объекта становятся ниже среднего уровня в совокупности объектов аналогичного целевого назначения, хотя в абсолютных значениях они могут не изменяться (моральный износ).

Наука о надежности изучает только абсолютное изменение показателей качества объектов, связанное с протеканием различных повреждающих процессов.

Специфическими особенностями вопросов надежности являются:

– **учет фактора времени.** Надежность является как бы «динамичной качеством», поскольку исследует временное количественное изменение показателей качества, первоначальный уровень которых был заложен при разработке, обеспечен при изготовлении и реализуется при эксплуатации;

– **прогностическая ценность результатов.** Проблемы надежности связаны с прогнозированием поведения объекта, т. к. простая констатация уровня надежности объекта, уже выработавшего свой ресурс, имеет, вообще говоря, малую ценность. Особенно большое значение имеет прогноз на ранних стадиях жизненного цикла объекта (разработка и изготовление), когда необходимо дать оценку эффективности принятых конструкторских решений и применяемых технологических методов для обеспечения требуемого уровня качества и эффективности применения объекта в предполагаемых условиях эксплуатации в течение необходимого времени применения.

Также следует отметить такие особенности:

– теория надежности – **трудный для изучения предмет.** Это объясняется широким использованием математики, в частности таких разделов, как теория вероятностей и математическая статистика, теория интегральных, алгебраических и дифференциальных уравнений, математическая логика, теория систем массового обслуживания, теория

графов, методы статистического моделирования, методы оптимизации и многое другое;

– необходимость применения *компьютерных технологий* при решении практических задач;

– *случайный характер отказов и восстановлений*, следовательно, любые решения задач надежности имеют вероятностный характер;

– *трудность математического моделирования* объектов из-за отсутствия достоверных данных о надежности элементов системы, в частности, данных о законах распределения отказов и восстановлений;

– *трудность*, а во многих случаях невозможность *статистических испытаний* из-за технических и экономических ограничений;

– *сложность современных систем* и, как результат, большие размерности уравнений, решение которых во многих случаях невозможно даже при использовании компьютерных технологий.

### ***Контрольные вопросы***

1. Охарактеризуйте последствия низкой надежности техники для экономики страны.

2. Сравните затраты на ремонт и техническое обслуживание машин в связи с их износом со стоимостью новой машины.

3. Охарактеризуйте этапы развития теории надежности.

4. Охарактеризуйте вклад российских ученых в развитие теории надежности.

5. Проанализируйте соотношение понятий «надежность» и «качество».

6. Проанализируйте абсолютное и относительное изменение качества объектов.

7. Охарактеризуйте специфические особенности теории надежности.

8. Охарактеризуйте предмет науки о надежности.

## 2 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

### 2.1 Система стандартов «Надежность в технике»

Все государственные стандарты по обеспечению надежности сведены в специальный класс 27 и объединены названием Система стандартов «Надежность в технике» (ССНТ). Назначение, структура и состав объектов стандартизации, правила наименования и обозначения стандартов ССНТ установлены ГОСТ 27.001-95 «Система стандартов. Надежность в технике. Основные положения». Ниже перечислены некоторые стандарты.

– ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

– ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

– ГОСТ 27.004-85. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения.

– ГОСТ 27.202-83. Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции.

– ГОСТ 27.203-83. Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности.

– ГОСТ 27.204-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности.

– ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.

– ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.

– ГОСТ 27.402-95. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Ч. 1. Экспоненциальное распределение.

– ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

### 2.2 Основные понятия, термины и определения

Обобщающим термином «*техника*» называют совокупность средств человеческой деятельности, созданных для осуществления процессов производства и удовлетворения непродовственных потребностей человека и общества.

Для обозначения любого образца создаваемой техники используется термин «изделие». **Изделием** (ГОСТ 2.101-68 «ЕСКД. Виды изделий и конструкторских документов») называется любой предмет производства (или набор предметов), подлежащий изготовлению на предприятии. Использование термина «изделие» для конкретного технического средства подчеркивает, что данный предмет рассматривается как продукт производства. В этом аспекте различают изделия неспецифицированные (не имеющие составных частей) – детали, и специфицированные (состоящие из двух и более составных частей) – сборочные единицы, комплексы и комплекты.

Двойственность рассмотрения одних и тех же конкретных технических средств в качестве изделий и систем (подсистем, элементов систем) объясняется тем, что технику, в особенности с точки зрения ее надежности и качества, обычно рассматривают и изучают в процессе ее временного развития, который складывается из жизненных циклов отдельных технических средств. **Жизненный цикл** делят на отдельные этапы, отличающиеся своими специфическими чертами, в том числе и особенностями задач, связанных с обеспечением надежности и эффективности.

Основные этапы жизненного цикла представлены ниже.

1. Этап **инициализации** цикла. Основные возможные варианты:

– *осознание* и изучение вновь сложившейся или изменившейся потребности в техническом средстве (возможно даже искусственное стимулирование потребности);

– *возникшая возможность* использования новых материалов, технологий, конструкторских решений, достижений фундаментальной и прикладной науки, накопленного опыта эксплуатации аналогичных технических средств.

2. Этап **создания**, включающий в себя следующие стадии:

– *разработка* (проектирование). Состав возможных стадий разработки определен ГОСТ 2.103-68: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, разработка рабочей документации на опытный образец (партию изделий), изготовление опытного образца (партии изделий), испытания опытного образца (партии изделий), подготовка документации на изделия серийного (массового) производства, изготовление и испытание установочной серии и т. д. Следует отметить, что вспомогательные технические средства, используемые на стадии разработки (опытные образцы, макеты, экспериментальные и испытательные установки), имеют свой жизненный цикл, не совпадающий с жизненным циклом основного технического средства.

Описанные выше стадии составляют *идеальную* часть жизненного цикла, на которой рассматриваемое техническое средство еще не существует как материальный объект, далее следует *материальная* часть жизненного цикла.

– *изготовление*;

– *поставка*.

3. Этап **применения** (эксплуатации), включающий в себя следующие стадии:

– *хранение*;

– *транспортирование*;

– *подготовка к применению по назначению* (развертывание, монтаж и наладка);

– *испытание*;

– *ожидание применения по назначению*;

– *применение по назначению*;

– *техническое обслуживание*;

– *ремонт*.

4. **Конечный** этап жизненного цикла (вывод из эксплуатации, списание, ликвидация и утилизация). Основаниями для перехода к конечному этапу могут быть:

– *исчезновение* или существенное изменение потребности;

– *моральное старение*;

– *физическое старение* (полное исчерпание ресурса вследствие физического износа и невозможность или нецелесообразность его восстановления путем ремонта).

При дальнейшем изложении курса для обозначения технического средства (изделия или системы, а также их составных частей – функциональных единиц, элементов, подсистем), рассматриваемого с точки зрения его надежности при разработке, изготовлении, испытании и эксплуатации, будет использоваться обобщающее понятие «**объект**». Таким образом, объект в теории надежности – это техническое средство определенного целевого назначения или его составная часть, рассматриваемые с точки зрения надежности на различных этапах жизненного цикла.

## 2.3 Система и ее элементы

Одним из основных понятий в теории надежности является понятие системы. Термин «система» имеет широкий диапазон значений и в общем случае определяет ограниченное множество элементов, поня-

тий, норм, условий с отношениями и связями между ними, образующих некоторую целостность.

**Система** – упорядоченная совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, образующих единое функциональное целое, предназначенное для решения определенных задач (достижения определенных целей). Это определение подчеркивает первичность цели при объединении каких-либо системообразующих факторов (материальных, человеческих, информационных и пр.) в систему. Если цель не сформулирована, предметного разговора о системе не может быть. Для технологических систем, в частности, целью является производство определенной продукции с определенными показателями качества и определенным тактом выпуска при регламентированных затратах материальных, энергетических, трудовых и прочих ресурсов. Для транспортных систем – это выполнение транспортной работы с необходимым качеством при минимальных затратах ресурсов.

**Элемент системы** – часть системы, предназначенная для выполнения определенных функций и неделимая на составные части при данном уровне рассмотрения.

Разбивка системы на элементы производится в зависимости от уровня исследования таким образом, чтобы каждый элемент выполнял определенные частные функции и имел самостоятельные характеристики надежности или состояния. Элементы системы, представляющие собой технические устройства, их блоки, узлы, детали, при рассмотрении конкретных задач могут обозначаться как функциональные элементы или структурные единицы. Элементы, которые невозможно или нецелесообразно разбивать на составные части, называются *первичными*. Характеристики их надежности, установленные по результатам испытаний или эксплуатации, приводятся в справочной литературе и нормативно-технической документации.

В состав системы в качестве ее элементов могут входить и нетехнические средства, такие, например, как программное и информационное обеспечение, человек-оператор и т. п. Системы различаются по составу и степени сложности в зависимости от вида и количества составляющих элементов, характера связей между ними и числа возможных перестроений структуры.

Применительно к конкретным условиям и уровню решаемых задач исследования и расчеты могут проводиться для всей системы в целом, для ее частей (подсистем) или для элементов, которые при необходимости могут рассматриваться как отдельные системы, состоящие из элементов более низкого уровня, в том числе и первичных. В соответствии с этим часто используется более общее понятие – объект

исследования, или просто объект, под которым понимается предмет проводимого исследования. Это может быть и система, и ее часть, и элемент.

Системы и их элементы подразделяются на восстанавливаемые, т. е. ремонтируемые без вывода из эксплуатации, и невосстанавливаемые. В качестве восстановительной операции может производиться замена отдельных частей или всего объекта в целом.

Решение многих задач надежности связано с анализом процессов изменения свойств объекта. Обычно, особенно на стадии проектирования, необходимые для этого исследования проводят на базе модели. Под моделью объекта или процесса понимается его формальное описание с помощью математических, табличных, графических или иных представлений, позволяющее в определенных пределах имитировать изменение свойств и характеристик надежности реального объекта.

## **2.4 Состояния и события перехода**

Под состоянием, или техническим состоянием объекта, понимается совокупность его свойств, характеризуемых признаками, установленными технической (конструкторской и нормативно-технической) документацией для определенных условий и режимов использования объекта.

В число таких признаков могут входить как числовые и иные характеристики свойств объекта, изменяющихся в процессе эксплуатации, так и характеристики неизменяющихся свойств (или изменяющихся в незначительных пределах). В качестве примера последних можно привести массогабаритные показатели, марки материала, типы комплектующих изделий, способы установки и крепления и т. п.

Ограничительные значения признаков, характеризующих свойства объекта, или пределы их допустимых при нормальной эксплуатации изменений приводятся в технической документации на объект и носят название технических требований. Технические требования обычно приводят в таких документах, как чертежи, схемы, спецификации, программы испытаний, инструкции по обслуживанию, технические условия на поставку, руководящие технические материалы, стандарты и др.

Иногда для характеристики состояния объекта вместо термина «признак» используют термин «показатель». Однако он имеет более ограниченное применение и фактически представляет собой признак, выраженный в числовом или функциональном виде.

Свойства объекта после его изготовления непрерывно изменяются под действием различного рода факторов, таких, например, как воз-



действия внешней среды, внутренние воздействия, определяемые характером и режимом функционирования, деградационные процессы старения и изнашивания и т. п.

Степень влияния основных факторов на изменение свойств объекта устанавливаются на стадиях его проектирования и испытания опытных образцов. При этом определяют минимальное необходимое количество признаков, контроль которых обеспечивает достоверную оценку наиболее характерных возможных изменений свойств объекта. Такие признаки называются диагностическими признаками, или диагностическими параметрами. Они приводятся в технической документации на объект и используются для контроля его технического состояния.

Совокупности различных технических состояний, удовлетворяющих или не удовлетворяющих определенным требованиям, образуют виды состояний. Применительно к задачам надежности рассматривают следующие виды состояний:

1) исправное состояние (исправность) – состояние объекта, при котором он удовлетворяет всем техническим требованиям;

2) неисправное состояние (неисправность) – состояние объекта, при котором он не удовлетворяет хотя бы одному техническому требованию;

3) работоспособное состояние (работоспособность) – состояние объекта, при котором он удовлетворяет всем техническим требованиям, характеризующим его способность выполнять заданные функции;

4) неработоспособное состояние (неработоспособность) – состояние объекта, при котором он не удовлетворяет хотя бы одному техническому требованию из числа характеризующих его способность выполнять заданные функции;

5) предельное состояние – состояние объекта, при котором дальнейшее его использование по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Признаки предельного состояния приводятся в технической документации на объект.

На рисунке 2.1 представлено соотношение множеств объектов с точки зрения теории надежности.

С изменением свойств объекта его состояние может изменяться в пределах одного вида или происходит переход в состояние другого вида. Событие перехода объекта из исправного в неисправное, но работоспособное состояние называется **повреждением**. Событие перехода объекта в неработоспособное состояние называется **отказом**.

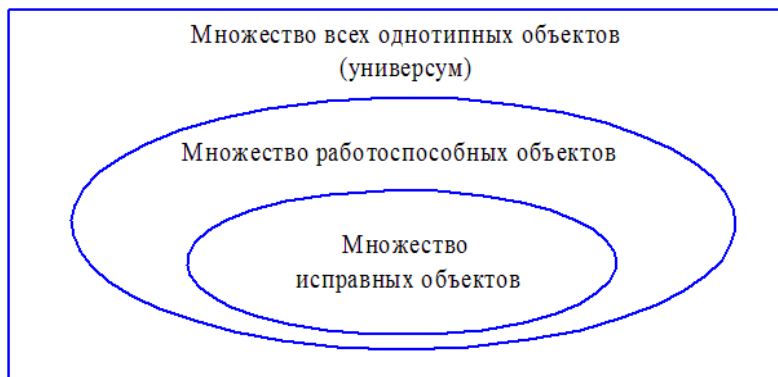


Рисунок 2.1 – Соотношение множеств объектов с точки зрения теории надежности

Отказы можно классифицировать по различным признакам (таблица 2.1). Рассмотрим наиболее часто используемые при исследовании надежности виды отказов.

Внезапный отказ – отказ, которому не предшествуют наблюдаемые направленные изменения одного или нескольких диагностических параметров.

Постепенный отказ – отказ, которому предшествуют постепенные наблюдаемые изменения одного или нескольких диагностических параметров, т. е. имеет место процесс контролируемого изменения степени работоспособности объекта.

Явный отказ – отказ, характеризующийся выходом объекта из состояния правильного функционирования.

Скрытый отказ – отказ, выявляемый лишь при проведении технического обслуживания объекта или специальными средствами и методами диагностирования.

Частичный отказ – переход в неработоспособное состояние одного или нескольких элементов, не приводящий к общему отказу объекта.

Сбой – самоустраняющийся отказ, приводящий к кратковременному нарушению работоспособности.

Важной задачей является не только установление факта отказа, но и определение причин и способов его устранения.

Таблица 2.1 – Классификация отказов

Признак классификации	Вид отказа
-----------------------	------------

1	2
Характер изменения основного параметра объекта до момента возникновения отказа	Внезапный Постепенный
Возможность последующего использования объекта после возникновения его отказа	Полный Частичный
Связь между отказами	Независимый Зависимый
Устойчивость неработоспособности	Устойчивый Самоустраняющийся
Наличие внешних проявлений отказа	Явный Скрытый
Причина возникновения отказа:	
при конструировании (ошибка конструктора, несовершенство методов конструирования)	Конструкционный
при изготовлении (нарушение принятой технологии, несовершенство технологии)	Производственный
при эксплуатации (нарушение правил эксплуатации, экстремальные внешние воздействия)	Эксплуатационный
Природа происхождения	Естественный Искусственный

Причинами отказа могут быть естественные процессы старения и изнашивания материала элементов объекта, отклонения условий эксплуатации, хранения, транспортирования от расчетных, нарушения правил эксплуатации, ошибки проектирования и конструирования, нарушение технологии изготовления и монтажа, дефекты в исходных материалах и комплектующих изделиях и т. п.

Причинами самоустраняющихся отказов могут быть помехи, дефекты программного обеспечения, кратковременные значительные изменения эксплуатационных условий и режимов.

Непосредственным следствием вышеперечисленных причин является возникновение дефектов, которые могут привести к нарушению работоспособности объекта (см. п. 4.1).

Примеры дефектов: механическое разрушение детали или узла, выход размера детали за пределы допуска, неправильная сборка или установка, применение первичного элемента с параметрами, отличными от указанных в конструкторской документации, обрыв в электрической цепи, нарушение целостности электрической изоляции, царапина на защитном или декоративном покрытии и т. п.

Процесс перевода отказавшего объекта в работоспособное состояние путем устранения дефекта без вывода объекта из эксплуатации

называется восстановлением. Устранение дефекта при этом может производиться посредством ремонта или замены дефектных элементов.

## 2.5 Надежность и эффективность

Понятие надежности определяет свойство объекта сохранять во времени работоспособное состояние в заданных режимах и условиях эксплуатации, хранения, транспортирования. Надежность – понятие сложное, включающее в себя характеристики некоторой совокупности более простых (частных) свойств, определяющих пригодность объекта к нормальной эксплуатации. Эти частные свойства называют также сторонами надежности, или ее составными частями. К их числу относятся безотказность, долговечность, сохраняемость, ремонтпригодность.

В свою очередь, надежность является одной из составляющих частей более широкого понятия – эффективности. Под эффективностью понимается обобщенное свойство объекта, характеризующее его приспособленность к выполнению поставленных задач с учетом *пригодности* к эксплуатации как в расчетных, так и в экстремальных условиях, *качества* выполнения заданного алгоритма действий, *затрат* на изготовление и эксплуатацию, характера *воздействия* на окружающую среду, степени *безопасности* эксплуатации и др.

На рисунке 2.2 приведена структурная схема связей составляющих частей эффективности и надежности технического объекта.

Живучесть определяет свойство объекта сохранять состояние работоспособности при неблагоприятных воздействиях, не соответствующих расчетным условиям нормальной эксплуатации.

Безопасность – свойство объекта в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды.

Качество функционирования характеризует уровень выполнения объектом части или всех функций в соответствии с заданным алгоритмом. Показатели обеспечиваемого качества функционирования приводятся в технической документации и могут входить в число диагностических параметров, обеспечивающих контроль таких, например, свойств, как быстродействие, точность, помехоустойчивость, пропускная способность и т. п.



Рисунок 2.2 – Структура понятия эффективности технического объекта

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки. При этом под наработкой понимается как продолжительность работы, измеряемая в единицах времени, так и объем выполненной работы или произведенных действий (километраж пробега, число рабочих циклов, оборотов, запусков и т. п.).

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния в расчетных условиях использования при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности, эффективности и пр. или нецелесообразным с учетом возможности проведения восстановительного ремонта. В то же время объект, перешедший в неработоспособное состояние, может не достигнуть предельного состояния, если восстановление его работоспособности целесообразно и возможно.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение всего времени хранения и (или) транспортирования, а также при перерывах в использовании. Для некоторых видов объектов сохраняемость включает требование сохранения установлен-

ного запаса работоспособности или же сохранения в заданных пределах показателей безотказности и долговечности.

Ремонтопригодность – свойство объекта, характеризующее его приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного или исправного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Термин «ремонтопригодность» включает в себя также и приспособленность объекта к *контролю технического состояния*. Контролепригодность – свойство объекта, характеризующее его приспособленность к диагностированию, т. е. контролю технического состояния, определению работоспособности, выявлению причин отказа, определению места и вида дефекта, вызвавшего отказ, прогнозированию изменения состояния и показателей надежности.

### ***Контрольные вопросы***

1. Сравните понятия «техника», «изделие» и «объект».
2. Охарактеризуйте этапы жизненного цикла технических средств.
3. Охарактеризуйте стадии этапа применения (эксплуатации).
4. Проанализируйте определение системы.
5. Проанализируйте определение элемента системы.
6. Сравните системы восстанавливаемые и невосстанавливаемые.
7. Модель объекта или процесса.
8. Охарактеризуйте техническое состояние объекта.
9. Приведите виды состояний объекта.
10. Проанализируйте соотношение различных состояний объекта.
11. Сравните понятия «неисправность» и «отказ».
12. Приведите классификацию отказов объекта.
13. Проанализируйте соотношение понятий «надежность» и «эффективность».
14. Приведите составные части надежности.
15. Проанализируйте монтажно-эксплуатационную эффективность объекта.
16. Охарактеризуйте понятия «живучесть» и «безопасность».

### 3 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПРОЦЕССАХ

#### 3.1 Случайные события и их потоки

Под событием в теории вероятностей понимается всякий факт, который в результате опыта (наблюдений) может произойти или не произойти.

События характеризуются степенью возможности их появления – вероятностью события. Максимальная вероятность присуща достоверному событию, т. е. такому событию, которое в результате опыта непременно должно произойти. Минимальная вероятность присуща невозможному событию, которое в данном опыте не может произойти. Эти экстремальные значения вероятностей оценивают соответственно числами 1 и 0. Все другие события – возможные, но не достоверные – будут характеризоваться вероятностями, числовые значения которых находятся в этом диапазоне. Такие события называются случайными.

Характерным признаком случайного события является то, что оно принадлежит к категории массовых явлений, т. е. существует возможность его оценки по результатам неоднократного повторения опыта в заданных условиях.

Случайные события, происходящие одно за другим в некоторой последовательности, образуют поток случайных событий. При этом события могут быть однородными или различными. В качестве примера потоков однородных событий можно привести потоки отказов и потоки восстановлений объекта. Такой поток можно представить в виде последовательности точек  $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$  на числовой оси времени, соответствующих моментам появления событий (рисунок 3.1).

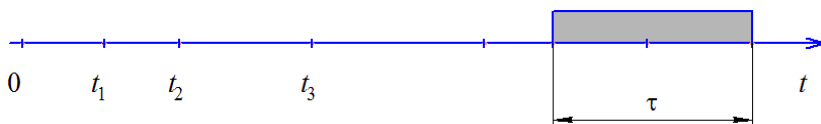


Рисунок 3.1 – Графическое представление потока однородных случайных событий

Потоки событий различаются в зависимости от вида и характера проявления их свойств.

*Стационарный поток* – поток, в котором вероятность попадания того или иного числа событий на некоторый участок времени  $\tau$  (см. рисунок 3.1) зависит только от длины этого участка и не зависит от его положения на оси времени. Для стационарного потока плотность

потока событий – среднее число событий в единицу времени – величина постоянная во времени.

*Поток без последействия* – поток событий, в котором для любых неперекрывающихся участков времени число событий, попадающих на один из них, не зависит от числа событий, попадающих на другой. Отсутствие последействия в потоке означает также, что будущее развитие процесса появления событий не зависит от того, как этот процесс протекал в прошлом.

*Ординарный поток* – поток событий, в котором вероятность попадания на элементарный участок времени  $\Delta t$  двух или более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одного события. Практически это означает, что в любой момент времени возможно лишь одно событие.

Если поток событий обладает всеми тремя рассмотренными свойствами (стационарность, ординарность и отсутствие последействия), он называется *простейшим*, или *стационарным пуассоновским, потоком*. Для него вероятность появления  $n$  числа событий на некотором интервале времени  $\tau$

$$P_n(\tau) = \frac{a^n}{n!} e^{-a}, (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (3.1)$$

где  $a$  – среднее число событий в интервале  $\tau$ .

Выражение (3.1) носит название закона распределения Пуассона.

Практика исследования потоков отказов, восстановлений, а также большинства других потоков, рассматриваемых при исследовании надежности, свидетельствует о возможности их представления как простейших.

### 3.2 Случайные величины

Случайной величиной называется величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, неизвестное заранее. В зависимости от вида возможных реализаций случайные величины подразделяются на дискретные и непрерывные.

*Дискретная случайная величина* может принимать значения только из некоторого дискретного множества, например, число отказов изделий из наблюдаемой выборки за установленный промежуток времени.

*Непрерывная случайная величина* может принимать любые значения на некотором конечном или бесконечном отрезке, например, тем-



пература масла в двигателе, время работы объекта до момента наступления отказа и т. п.

Случайные величины обозначают заглавными буквами конца латинского алфавита ( $X, Y, Z, \dots$ ), а их возможные значения – соответствующими малыми буквами ( $x, y, z, \dots$ ).

Полное представление о случайной величине дает закон распределения случайной величины, устанавливающий соотношение между возможными ее значениями и их вероятностями.

Закон распределения может быть задан в различной форме. Так, например, простейшими формами его задания являются табличная и графическая.

Универсальной характеристикой, описывающей закон распределения, является *функция распределения* случайной величины, выражающая вероятность того, что величина  $X$  может принимать значения меньше некоторого установленного  $x$ :

$$F(x) = P(X < x). \quad (3.2)$$

Выражение (3.2) представляет собой интегральную форму закона распределения.

При решении некоторых задач надежности необходимо рассчитывать вероятность попадания случайной величины на участок в диапазоне значений от  $\alpha$  до  $\beta$ , т. е.  $P(\alpha < X < \beta)$ .

Выразим эту вероятность через функцию распределения величины  $X$ . Для этого рассмотрим три события:

- событие  $A$ , состоящее в том, что  $X < \beta$ ;
- событие  $B$ , состоящее в том, что  $X < \alpha$ ;
- событие  $C$ , состоящее в том, что  $\alpha < X < \beta$ .

Событие  $A$  включает в себя события  $B$  и  $C$ , т. е.  $A = B + C$ . События  $B$  и  $C$  несовместные, т. к. они не могут появляться вместе. Для этого случая применима теорема сложения вероятностей, которая формулируется следующим образом. Вероятность суммы несовместных событий равна сумме их вероятностей.

Следовательно, можно записать

$$P(X < \beta) = P(X < \alpha)$$

или

$$F(\beta) = F(\alpha) + P(\alpha < X < \beta),$$

откуда

$$P(\alpha < X < \beta) = F(\beta) - F(\alpha), \quad (3.3)$$

т. е. вероятность попадания случайной величины на заданный участок равна приращению функции ее распределения на этом участке.

Рассмотрим в общем случае вместо участка  $(\alpha, \beta)$  участок  $(x, x + \Delta x)$ . Тогда в соответствии с формулой (3.3)

$$P(x < X < x + \Delta x) = F(x + \Delta x) - F(x).$$

Выразим величину средней вероятности на этом участке и вычислим ее предел при  $\Delta x \rightarrow 0$ . В результате получим производную от функции распределения случайной величины  $X$ :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = F'(x). \quad (3.4)$$

Введем обозначение

$$F'(x) = f(x). \quad (3.5)$$

Функция  $f(x)$  – производная функции распределения – характеризует плотность, с которой распределяются значения случайной величины. Эта функция называется *плотностью распределения*, или *плотностью вероятности случайной величины*. Она существует лишь для непрерывной дифференцируемой функции  $F(x)$ , т. е. лишь для непрерывных случайных величин, и представляет собой дифференциальную форму закона распределения.

Функцию  $f(x)$  можно выразить графически кривой распределения, например, как показано на рисунке 3.2.

Вероятность попадания величины  $X$  на некоторый участок  $(\alpha, \beta)$

$$P(\alpha < X < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx, \quad (3.6)$$

т. е. равна площади под кривой распределения, опирающейся на этот участок, как показано на рисунке 3.3. Величина  $f(x)dx$  называется *элементом вероятности*. Геометрически он представляет собой площадь элементарного прямоугольника, опирающегося на отрезок  $dx$ .

Зададимся обратной задачей – выразим функцию распределения через плотность распределения. По определению

$$F(x) = P(X < x) = P(-\infty < X < x), \quad (3.7)$$

откуда по формуле (3.6) имеем

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx. \quad (3.8)$$

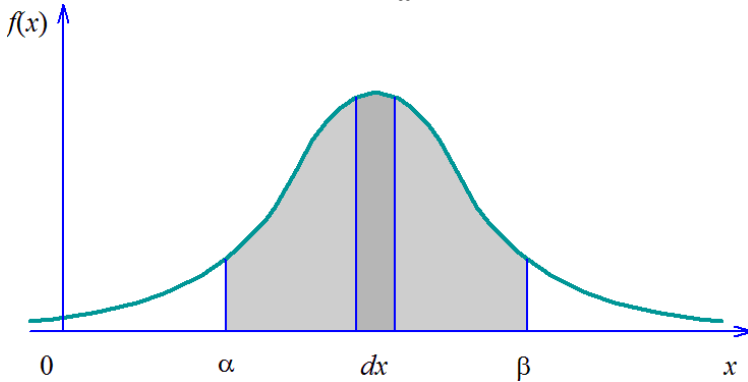


Рисунок 3.2 – Кривая распределения непрерывной случайной величины

Геометрически  $F(x)$  представляет собой площадь под кривой распределения, лежащую левее текущей координаты  $x$ .

### 3.3 Характеристики положения случайной величины

Функция распределения и плотность распределения полностью описывают случайную величину с вероятностной точки зрения. Однако при решении ряда практических задач нет необходимости в такой полной характеристике. Зачастую достаточно бывает указать только отдельные числовые параметры, характеризующие некоторые существенные признаки распределения случайной величины. Такие параметры называются *числовыми характеристиками* случайной величины.

Наиболее часто используемыми из них являются характеристики, определяющие положение случайной величины на числовой оси: математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение.

*Математическое ожидание* ( $M_x$ ) определяет центр распределения случайной величины, вокруг которого группируются все ее возможные значения.

Для дискретной случайной величины

$$M_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i, \quad (3.9)$$

где  $n$  – число возможных значений случайной величины;  $p_i$  – вероятность  $i$ -го значения случайной величины ( $x_i$ ).

Для непрерывной случайной величины

$$M_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \quad (3.10)$$

*Дисперсия* ( $D_x$ ) характеризует рассеяние значений случайной величины около ее математического ожидания.

Для дискретной величины

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2 p_i, \quad (3.11)$$

для непрерывной

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_x)^2 f(x) dx. \quad (3.12)$$

*Среднее квадратическое отклонение*, или *стандарт*, случайной величины  $X$

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (3.13)$$

На практике числовые характеристики случайных величин часто определяют по результатам эксперимента в виде статистических оценок:

$$\hat{M}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (3.14)$$

$$\hat{D}_x = s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2, \quad (3.15)$$

где  $n$  – число наблюдений;  $\bar{X}$  – среднее арифметическое результатов наблюдений.

*Коэффициент вариации* также характеризует рассеивание случайной величины с учетом средней величины обработки

$$v = \frac{\sigma_x}{\bar{X}}.$$

Различают случайные величины с малой вариацией ( $v \leq 0,1$ ), средней вариацией ( $0,1 < v \leq 0,33$ ) и большой вариацией ( $v > 0,33$ ).

### 3.4 Законы распределения случайных величин

Вид характеристик случайной величины  $F(x)$  и  $f(x)$  определяет характер ее распределения. В теории вероятностей известно большое число видов таких распределений. Они называются законами распределения и имеют собственные названия.

В теории надежности наиболее широкое распространение получили следующие из них: биномиальный (биномиальное распределение) и Пуассона – для дискретных случайных величин; экспоненциальный (экспоненциальное распределение), Гаусса (нормальный закон, или нормальное распределение), Вейбулла и гамма-распределение – для непрерывных случайных величин.

**Биномиальное** распределение представляет собой распределение вероятностей появления  $n$  событий в  $m$  независимых опытах, в каждом из которых вероятность появления рассматриваемого события постоянна и равна  $p$ .

$$P_m^n = C_m^n p^n (1 - p)^{m-n}, \quad (3.16)$$

где  $C_m^n$  – число сочетаний из  $m$  по  $n$ .

$$C_m^n = \frac{m!}{n! (m - n)!}$$

Математическое ожидание и дисперсия числа событий

$$M_n = mp; D_n = M_n(1 - p) = mp(1 - p).$$

Биномиальному распределению подчиняется, например, число бракованных изделий из большой партии продукции.

**Закон Пуассона** описывает распределение вероятностей числа событий  $n$ , происходящих в некоторых одинаковых интервалах времени  $\tau$  при условии, что поток рассматриваемых событий является простейшим. В соответствии с выражением (3.1) он может быть представлен как

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} e^{-\lambda\tau}, \quad (3.17)$$

где  $\lambda$  – интенсивность появления случайного события (среднее число событий в единицу времени);  $\lambda\tau$  – среднее число событий за время  $\tau$ .

Математическое ожидание и дисперсия событий в интервале времени  $\tau$

$$M_{n,\tau} = \lambda\tau; \quad D_{n,\tau} = \lambda\tau.$$

Закон Пуассона обычно применяют для определения вероятности отказов сложных восстанавливаемых объектов, в состав которых входит большое число высоконадежных элементов. В этих случаях поток отказов объекта представляет собой сумму большого числа потоков редких отказов отдельных элементов. При этом на рассматриваемом интервале времени отказы объекта, вызываемые отказом любого из элементов, происходят относительно часто, но их вероятность весьма мала.

**Экспоненциальное** распределение применяют при исследовании времени наработки до отказа невосстанавливаемых объектов и для определения времени между последовательными отказами в восстанавливаемых объектах. Таким образом, в качестве случайной величины здесь выступает время наработки до отказа или между отказами –  $T$ .

Характеристики распределения, соответствующие экспоненциальному закону:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (3.18)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (3.19)$$

Характеристики положения случайной величины  $T$ :

$$M_t = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}; \quad (3.20)$$

$$D_t = \int_0^{\infty} (t - M_t)^2 f(t) dt = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (3.21)$$

Отличительным признаком экспоненциального распределения является постоянство интенсивности отказов  $\lambda$ , что наблюдается при работе объекта в интервале времени, когда период приработки закончился, а процесс старения и изнашивания еще не проявляется в явном виде.

Условие  $\lambda = \text{const}$  также выполняется при наблюдении за сложными восстанавливаемыми объектами, у которых отказы вызываются отказами любого из большого числа составляющих элементов, что характерно для простейшего потока отказов.

Этими обстоятельствами, а также возможностью существенного упрощения расчетов в пределах допустимых погрешностей объясняется широкое применение экспоненциального закона в инженерной практике.

**Нормальный** закон распределения наиболее часто применяется на практике. Его используют обычно, когда случайная величина зависит от большого числа случайных факторов, однородных по своему влиянию, причем влияние каждого из них по сравнению со всей их совокупностью незначительно. Этим законом хорошо описываются результаты независимых измерений физических величин, когда в качестве случайной величины выступает измеряемый параметр. Нормальному закону подчиняется также распределение такой случайной величины, как время наработки объекта до отказа, особенно в период, когда начинают существенно проявляться явления изнашивания и старения.

В общем случае характеристики распределения случайной величины  $X$  имеют вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x - M_x)^2}{2\sigma_x^2} \right]; \quad (3.22)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \left[ -\frac{(x - M_x)^2}{2\sigma_x^2} \right] dx. \quad (3.23)$$

Если в качестве случайной величины рассматривается время, например, продолжительность безотказной работы объекта, то используется усеченный нормальный закон

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp \left[ -\frac{(t - M_t)^2}{2\sigma_t^2} \right] dt. \quad (3.24)$$

При этом следует иметь в виду, что выражение (3.23) справедливо лишь при условии  $M_t > 2\sigma_t$ .

Для удобства вычисления формула (3.22) приводится к виду

$$F(x) = 0,5 + \Phi(u), \quad (3.25)$$

где выражение

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (3.26)$$

носит название *нормальной функции распределения*, или *нормированной функции Лапласа*. Ее значения для аргумента

$$u(x) = \frac{x - M_x}{\sigma_x} \quad (3.27)$$

приводятся в справочной литературе. Аналогично преобразуется и выражение (3.23).

Графики, характеризующие экспоненциальное и нормальное распределения, приведены на рисунке 3.3.

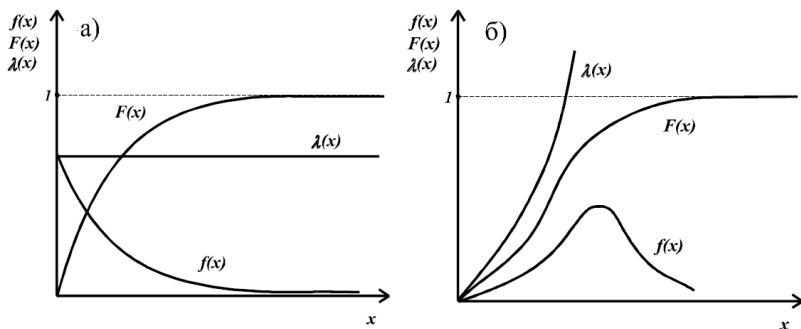


Рисунок 3.3 – Графическое представление законов распределения:  
а – экспоненциального; б – нормального

Для нормального закона распределения часто используют т. н. **правило «трех сигм»**: вероятность того, что случайная величина отклонится от своего математического ожидания на большую величину, чем утроенное среднее квадратичное отклонение, практически равна нулю. Т. е. вероятность можно исключить из рассмотрения, если вы-



полняется условие:  $|x_i - \bar{x}| \geq 3\sigma$ ; при этом вероятность попадания в интервал  $6\sigma$  составляет 0,9973 (рисунок 3.4).

Правило справедливо только для случайных величин, распределенных по нормальному закону.

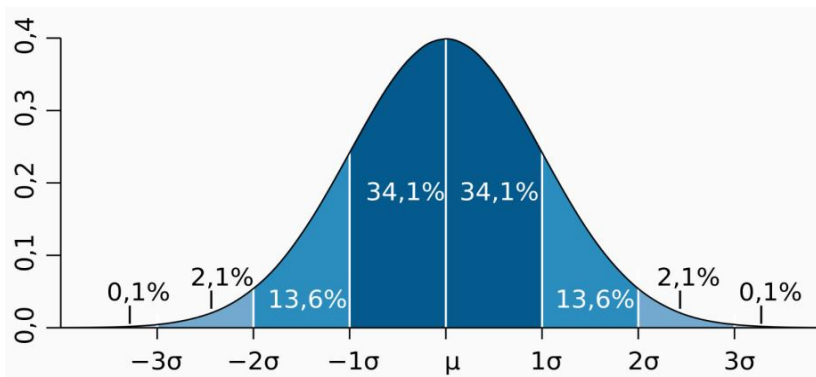


Рисунок 3.4 – Плотность вероятности нормального распределения и доля попаданий случайной величины на отрезки, равные среднему квадратическому отклонению

*Пример.* Пусть имеется выборка наблюдений за годовым пробегом автомобилей. Значения их распределены по нормальному закону с математическим ожиданием 75 тыс. км и среднеквадратическим отклонением 10 тыс. км. Тогда в соответствии с правилом «трех сигм» пробеги менее чем  $75 - 10 \cdot 3 = 45$  и более чем  $75 + 10 \cdot 3 = 105$  тыс. км являются практически невозможными событиями. Фактически это означает, что рассматривать такие пробеги как потенциально возможные не имеет смысла.

**Гамма-распределение** ( $\gamma$ -распределение) случайной величины используется для характеристики времени возникновения отказов сложных электротехнических систем на начальной стадии эксплуатации, т. е. в период их приработки, а также при исследовании надежности объектов с резервированными элементами. При этом рассматриваются события отказа объекта после  $k$  отказов элементов, подчиняющихся экспоненциальному закону распределения с интенсивностью  $\lambda_0$ .

Характеристики гамма-распределения:

$$f(t) = \lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{k-1}}{\Gamma(k)} e^{-\lambda_0 t}; \quad (3.28)$$

$$F(t) = \lambda_0 \frac{\lambda_0^k}{\Gamma(k)} \int_0^t t^{k-1} e^{-\lambda_0 t} dt, \quad (3.29)$$

где  $\lambda_0$  и  $k$  – параметры гамма-распределения;  $\Gamma(k) = (k - 1)!$  – гамма-функция.

**Распределение Вейбулла** – распределение, промежуточное между нормальным и экспоненциальным. Оно удобно для подбора наиболее подходящего выражения по результатам эксперимента.

Наблюдается при отказах некоторых механических узлов, например, шарикоподшипников; при отказах электрической изоляции, иницируемых постепенным накоплением дефектов; при отказах некоторых электрических элементов в период приработки и в режимах ускоренных испытаний на надежность, т. е. когда имеют место механические и электрические перегрузки.

Вид функции распределения по этому закону

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda_0 t^a). \quad (3.30)$$

Плотность распределения –

$$f(t) = \lambda_0 a t^{a-1} \exp(-\lambda_0 t^a), \quad (3.31)$$

где  $\lambda_0$ ,  $a$  – параметры закона распределения.

Распределение Вейбулла универсально:

- при  $\alpha = 1$  распределение превращается в экспоненциальное;
- при  $\alpha < 1$  функции плотности и интенсивности отказов убывающие;
- при  $\alpha > 1$  интенсивность отказов возрастающая;
- при  $\alpha = 2$  функция  $\lambda(t)$  линейная и распределение Вейбулла превращается в распределение Рэля с плотностью

$$f(t) = 2\lambda t e^{-\lambda t^2};$$

- при  $\alpha = 3,3$  распределение Вейбулла близко к нормальному.

### 3.5 Случайные процессы

Если случайная величина изменяется в процессе опыта в связи с изменением некоторых факторов, то ее можно характеризовать случайной функцией, т. е. такой функцией, которая в результате опыта принимает тот или иной вид, неизвестный заранее. Конкретный вид,

принимаемый случайной функцией при проведении опыта, называется ее реализацией.

Случайная функция, аргументом которой является время, называется случайным, или вероятностным, процессом. Понятие «поток событий» и «процесс» взаимосвязаны.

Например, процесс изменения состояния объекта вызывается потоками отказов и восстановлений. Более того, в некоторых литературных источниках эти понятия рассматриваются как идентичные.

Рассмотрим некоторый случайный процесс (случайную функцию)  $X(t)$ . Предположим, что в результате проведения  $n$  независимых опытов получено  $n$  ее реализаций (рисунок 3.5). Обозначим их соответственно номеру опыта как  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ , ...,  $x_n(t)$ . Каждая из этих реализаций является обычной (неслучайной) функцией времени.

Зафиксируем некоторое значение аргумента, например,  $t = t_j$ . При этом получим  $n$  численных значений  $x_1(t_j)$ ,  $x_2(t_j)$ , ...,  $x_n(t_j)$  случайной величины  $X(t_j)$  в момент времени  $t_j$ .

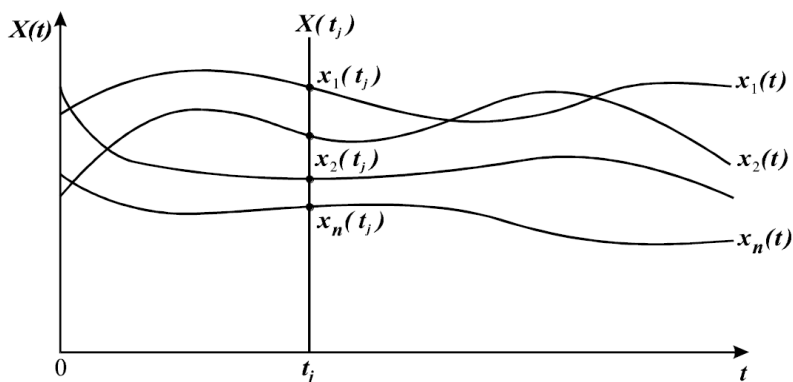


Рисунок 3.5 – Пример реализации случайного процесса

Используя  $m$  подобных сечений по оси  $t$ , можно с некоторым приближением заменить рассмотрение случайной функции рассмотрением системы  $m$  случайных величин:  $X(t_1)$ ,  $X(t_2)$ , ...,  $X(t_m)$ . По мере увеличения числа таких сечений подобная замена дает все большую точность. В пределе при бесконечно большом числе сечений можно получить полностью адекватное описание случайной функции. Таким образом, понятие случайной функции можно рассматривать как обобщенное понятие системы случайных величин. Следовательно, к случайной функции применимо такое понятие, как закон распределе-

ния. Однако его выражение в виде функции бесконечного множества аргументов практически невозможно.

При решении задач надежности используют вероятностные характеристики, аналогичные рассмотренным законам распределения случайных величин, но для определенных временных сечений. Эти характеристики в общем случае зависят от места сечения, т. е. от значения  $t$ , и выражаются как  $F(x, t)$ . Функция такого вида называется одномерной функцией распределения случайной функции  $X(t)$  и выражает одномерный закон распределения.

Обычно рассматривают отдельные свойства случайных функций, для описания которых используют простейшие характеристики, аналогичные числовым характеристикам случайных величин, такие как математическое ожидание, дисперсия и среднееквадратическое отклонение, рассчитываемые для различных моментов времени.

В отличие от числовых характеристик случайных величин, представляющих собой определенные числовые значения, характеристики случайных функций в общем случае представляют собой не числа, а функции времени, причем неслучайные.

*Математическим ожиданием случайной функции  $X(t)$*  называется неслучайная функция  $M_x(t)$ , которая при каждом значении аргумента  $t$  равна математическому ожиданию случайной величины в соответствующем сечении случайной функции. Она представляет собой некоторую среднюю функцию, около которой варьируются все возможные реализации случайного процесса.

*Дисперсией случайной функции  $X(t)$*  называется неслучайная функция  $D_x(t)$ , значение которой для каждого  $t$  равно дисперсии случайной величины в этом сечении.

В соответствии с этими определениями  $M_x(t)$  и  $D_x(t)$  могут быть рассчитаны по формулам, рассмотренным в подразделе 3.3.

Среднее квадратическое отклонение случайной функции

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}. \quad (3.32)$$

Если аргумент  $t$  принимает лишь дискретные значения, функцию  $X(t)$  называют случайным процессом с дискретным временем (случайная последовательность событий), если же  $t$  изменяется в некотором интервале, то  $X(t)$  – случайный процесс с непрерывным временем.

В свою очередь, если случайные величины из совокупности, образующей  $X(t)$ , принимают дискретные значения, то имеет место процесс с дискретными случайными значениями, если же – непрерывные, то имеет место процесс с непрерывными случайными значениями.

### ***Контрольные вопросы***

1. Охарактеризуйте потоки случайных событий.
2. Охарактеризуйте свойства простейшего потока случайных событий.
3. Проанализируйте свойство стационарности потока.
4. Проанализируйте свойство отсутствия последствия потока.
5. Проанализируйте свойство ординарности потока.
6. Охарактеризуйте дискретные и непрерывные случайные величины.
7. Проанализируйте физический смысл функции распределения случайной величины.
8. Охарактеризуйте функцию плотности вероятности случайной величины.
9. Приведите числовые характеристики случайной величины.
10. Охарактеризуйте параметры экспоненциального распределения случайной величины.
11. Охарактеризуйте параметры нормального закона распределения случайной величины.
12. Продемонстрируйте правило «трех сигм».
13. Каким образом вычисляется вероятность безотказной работы объекта с помощью нормированной функции Лапласа?
14. Проанализируйте свойства распределения Вейбулла.
15. Проанализируйте понятие реализации случайного процесса.

## 4 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОТКАЗОВ

### 4.1 Источники и причины изменения выходных параметров объектов

Те изменения, которые происходят с течением времени в любом объекте и приводят к потере им работоспособности, связаны с внешними и внутренними энергетическими воздействиями, которым подвергается объект во время эксплуатации. При этом имеются три основных источника воздействий:

- 1) *действие энергии окружающей среды*, включая человека, выполняющего функции оператора и ремонтника;
- 2) *внутренние источники энергии*, связанные с рабочими процессами, протекающими в объекте;
- 3) *накопленная потенциальная энергия* материалов, из которых изготовлен объект (внутренние напряжения в отливках, монтажные деформации и т. п.)

Различные виды энергии (механическая, тепловая, химическая, электромагнитная, ядерная, биоэнергия), действуя на объект, инициируют в его составных частях процессы, изменяющие свойства или состояние материалов. Эти процессы связаны, как правило, со сложными физико-химическими явлениями и приводят к деформации, износу, разрушению и другим видам повреждений (отклонения контролируемых свойств материалов от их первоначального уровня). Накопление повреждений, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных качественных параметров объекта, что, в конечном счете, приводит к отказу.

Например, механическая энергия, действующая в звеньях кинематической цепи рулевого управления, инициирует процесс изнашивания в подвижных звеньях сопряжений. Следствием протекания этого процесса является накопление повреждений в контактных зонах, что вызывает искажение начальной формы сопряжений, приводящее к потере кинематической точности. При достижении геометрической погрешности определенного предельного уровня, возникает параметрический отказ системы.

Процессы, снижающие работоспособность объекта, по признаку скорости их протекания можно разделить на три группы.

1. ***Быстропротекающие процессы*** имеют периодичность изменения, составляющую малую долю продолжительности рабочего цикла объекта. Сюда можно отнести:

- вибрации деталей и узлов;
- изменения сил трения в подвижных сопряжениях;
- колебания уровня рабочих нагрузок и другие процессы, искажающие рабочий цикл объекта.

2. *Процессы средней скорости*, имеющие периодичность, сравнимую с длительностью рабочего цикла объекта. Они приводят к монотонному изменению выходных параметров объекта. Сюда можно отнести:

- необратимый процесс изнашивания тормозных колодок, протектора шин (интенсивность изнашивания этих элементов на несколько порядков превосходит интенсивность изнашивания деталей подвижных сопряжений);
- обратимые процессы тепловых деформаций, обусловленные как диссипацией энергии рабочих процессов, так и суточными колебаниями температуры окружающей среды.

Обратимые процессы (в отличие от необратимых) временно изменяют выходные параметры объекта без тенденции прогрессивного ухудшения. Следует отметить, что в ряде случаев обратимый процесс может инициировать необратимый процесс, приводящий к накоплению повреждений, например, тепловая деформация полуоси привода может привести к возрастанию нагрузки на подшипники и их ускоренному износу или разрушению, т. е. отказу.

3. *Медленные процессы* имеют периодичность, сравнимую с длительностью межремонтного периода. К ним можно отнести:

- процессы изнашивания деталей подвижных сопряжений;
- перераспределение внутренних напряжений в деталях вследствие процесса старения материалов;
- ползучесть материалов;
- процессы коррозии;
- загрязнение трущихся поверхностей деталей.

Обычными методами борьбы с последствиями медленных процессов являются периодические ремонты и техническое обслуживание.

## 4.2 Виды повреждений объектов

Виды повреждений объектов и их составных частей и соответствующие им отказы можно разбить на две группы.

1. Допустимые повреждения, возникающие при нормальных условиях эксплуатации (износ тормозных колодок, тормозного диска,

резинометаллических и сферических шарниров подвески и т. п.). Полностью устранить этот вид повреждений невозможно, но можно замедлить их проявление.

2. Недопустимые повреждения, возникающие вследствие наличия дефектов или случайных неконтролируемых внешних причин, непосредственно не связанных с техническим состоянием рассматриваемого объекта (аварии, стихийные бедствия и т. п.).

Под дефектом понимается каждое отдельное несоответствие объекта установленным требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, снижающее его уровень надежности. Следует отметить, что объект, имеющий дефект, может находиться в работоспособном состоянии. Дефект рассматривается как возможная причина возникновения отказа, но наличие дефекта не означает, что отказ произошел.

По признаку стадии происхождения дефекты можно разделить на три группы.

1) Дефекты (ошибки) проектирования:

- недостаточная защищенность узлов трения;
- наличие концентраторов напряжений на деталях;
- неправильный расчет несущей способности деталей (приводит к их статическому разрушению или малоцикловой усталости);
- неправильный выбор материалов;
- неправильное определение предполагаемого уровня эксплуатационных нагрузок и т. п.

2) Дефекты изготовления (производственные):

- дефекты заготовок (пористость, усадочные раковины, неметаллические включения, охрупчивающие примеси и т. п.);
- дефекты механической обработки (прижоги, задиры, заусенцы, избыточная локальная пластическая деформация и т. п.);
- дефекты сварки (трещины, остаточные напряжения, термические повреждения основного материала и т. п.);
- дефекты термообработки (перегрев, закалочные трещины, поводка, коробление, обезуглероживание поверхностного слоя);
- дефекты сборки (повреждения поверхностей, задиры, перекосы, внесение абразива и т. п.).

3) Дефекты эксплуатации:

- нарушение условий применения;
- некачественное (несвоевременное, неполное, с отклонениями от технологии, с использованием некачественных материалов и запасных частей и др.) техническое обслуживание и ремонт;



- наличие перегрузок и непредвиденных нагрузок;
- применение некачественных эксплуатационных материалов.

### 4.3 Изменение интенсивности потока отказов в период эксплуатации

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  сложных систем имеет характерный вид U-образной кривой (рисунок 4.1). На этой кривой выделяют три характерных участка.



Рисунок 4.1 – Характерное изменение интенсивности потока отказов

1. Начальный период эксплуатации. Повышенный уровень интенсивности отказов на этом участке объясняется наличием скрытых дефектов изготовления, которые, проявляясь в начальный период эксплуатации, приводят к отказам объекта. Это период приработки.

2. Период нормальной эксплуатации. В течение этого периода, когда уровень накопленных износных повреждений еще не настолько высок, чтобы вызвать ухудшение выходных качественных параметров объекта, интенсивность отказов обычно имеет стабильно низкое значение, уровень которого определяется особенностями вида объекта, его исходным качеством, режимами и условиями эксплуатации. Обычно в этом периоде эксплуатации наблюдается несколько характерных для объекта видов внезапных отказов (проколы шин, отказы элементов

светотехники, фильтрующих элементов, свечей зажигания и др.), которые в совокупности определяют уровень интенсивности отказов на этом участке.

3. Заключительный период эксплуатации. В течение этого периода эксплуатации происходит прогрессивное ухудшение выходных параметров объекта, вызванное накопленными износными и деградиационными повреждениями, что вызывает возрастание интенсивности отказов.

### ***Контрольные вопросы***

1. Опишите основные источники воздействий, приводящих к потере работоспособности объекта.

2. Классифицируйте процессы, снижающие работоспособность объекта, по признаку скорости их протекания.

3. Опишите виды повреждений объектов.

4. Приведите примеры дефектов проектирования.

5. Приведите примеры дефектов изготовления.

6. Приведите примеры дефектов эксплуатации.

7. Проанализируйте изменение интенсивности отказов (U-образная кривая).

## 5 ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность как свойство объекта проявляется в течение всего времени начиная с момента его изготовления и до момента снятия с эксплуатации. При этом для невосстанавливаемых объектов характерны стадии транспортирования, хранения, монтажа, подготовки к эксплуатации, безотказной работы по назначению, простоев, диагностирования, технического обслуживания. Для восстанавливаемых объектов добавляются стадии восстановления.

Продолжительность каждой стадии в общем случае представляет собой случайную величину, а всю продолжительность жизненного цикла объекта можно описать как поток случайных событий, таких как включения в рабочий режим, остановки, переводы в режим диагностирования, отказы, восстановление и пр. Следовательно, количественные оценки надежности и ее составляющих частей должны иметь вероятностный характер и могут быть представлены в виде показателей, используемых для характеристики случайных величин и случайных процессов.

На стадиях проектирования объекта показатели надежности определяются в виде вероятностных характеристик его надежностной модели. На стадиях экспериментальной отработки, испытаний и эксплуатации показатели надежности определяются по результатам непосредственных наблюдений за объектом или группой одинаковых объектов в однородных условиях.

В первом случае используется аппарат теории вероятностей, и показатели выражают в виде их математических определений, или математических оценок. Во втором случае используется аппарат математической статистики, и показатели надежности выражают в виде статистических определений, или статистических оценок.

Достоверность статистических оценок показателей надежности в большой степени зависит от числа наблюдений и объема получаемой при этом информации. Их использование при исследовании надежности обосновано лишь применительно к объектам крупносерийного производства, а также к восстанавливаемым объектам с большой продолжительностью эксплуатации.

Показатели (численное значение критерия) надежности принято классифицировать по следующим признакам:

- 1) по свойствам надежности:
  - показатели безотказности;
  - показатели долговечности;

- показатели ремонтпригодности;
- показатели сохраняемости;
- 2) по числу свойств надежности, характеризуемых показателем:
  - единичные показатели (характеризуют одно из свойств надежности);
  - комплексные показатели (характеризуют одновременно несколько свойств надежности, например, безотказность и ремонтпригодность);
- 3) по числу характеризуемых объектов:
  - групповые;
  - индивидуальные;
  - смешанные;

Групповые показатели могут быть определены и установлены только для совокупности объектов; уровень надежности отдельного экземпляра они не регламентируют.

Индивидуальные показатели устанавливают норму надежности для каждого экземпляра из рассматриваемой совокупности (или единичного объекта).

Смешанные показатели могут выступать как групповые или индивидуальные.

4) по источнику информации для оценки уровня показателя:

- расчетные;
- экспериментальные;
- эксплуатационные;
- экстраполированные.

Экстраполированные показатели надежности – показатели, точечная или интервальная оценка которых определяется на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

5) по размерности показателя различают показатели, выражаемые:

- наработкой;
- сроком службы;
- безразмерные (в том числе вероятности событий).

## **5.1 Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов**

*Вероятность отказа* – вероятность того, что в пределах заданного времени (наработки) произойдет хотя бы один отказ объекта.

Ее математическое определение

$$Q(t) = P(T < t), \quad (5.1)$$

где  $T$  – случайная величина времени безотказной работы;  $t$  – заданное значение времени.

Из сравнения этого выражения с выражением (3.2) следует, что вероятность отказа представляет собой функцию распределения случайной величины – функцию распределения отказов, т. е.  $Q(t) = F(t)$ .

Статистическое определение вероятности отказа

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (5.2)$$

где  $N$  – количество объектов, работоспособных в начальный момент времени наблюдений ( $t = 0$ ) или поставленных на испытание;  $n(t)$  – количество объектов, отказавших в интервале времени наблюдения от 0 до  $t$ .

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданного времени или заданной наработки отказа объекта не произойдет

$$P(t) = 1 - Q(t). \quad (5.3)$$

Из выражений (5.1) и (5.2) соответственно получим:

$$P(t) = P(T < t); \quad (5.4)$$

$$\hat{P}(t) = \frac{N - n(t)}{N}. \quad (5.5)$$

Зависимость  $P(t)$  называют иногда функцией надежности.

Показатели, определяемые по формулам (5.1)–(5.5), используются в основном при расчетах надежности невосстанавливаемых объектов. Использование их применительно к восстанавливаемым объектам возможно для оценки надежности до первого отказа или между смежными отказами, но при условии полного восстановления характеристик объекта до первоначального уровня.

Плотность распределения времени безотказной работы (плотность вероятности отказа) невосстанавливаемых объектов  $f(t)$  представляет собой плотность безусловной вероятности возникновения

первого отказа объекта, определяемую для рассматриваемого момента времени. Ее математическое определение при  $\Delta t \rightarrow 0$  в соответствии с формулой (3.5)

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (5.6)$$

Некоторые авторы называют этот показатель частотой отказов и обозначают как  $a(t)$ . Его статистическая оценка рассчитывается по результатам опыта как отношение числа объектов  $n(\Delta t)$ , отказавших в единицу времени в интервале  $\Delta t$  от  $(t - \Delta t/2)$  до  $(t + \Delta t/2)$ , к числу объектов на момент начала испытаний при условии, что отказавшие объекты снимаются с испытаний без их замены:

$$\hat{a}(t) = \hat{f}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t}. \quad (5.7)$$

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  – плотность условной вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Математически  $\lambda(t)$  – условная плотность вероятности отказа, т. е.

$$\lambda(t) = \frac{f(\Delta t)}{P(\Delta t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (5.8)$$

Если поток отказов рассматривать как пуассоновский поток событий, интенсивность отказов будет характеризовать математическое ожидание числа отказов в единицу времени на исследуемом интервале.

Статистическая оценка интенсивности отказов рассчитывается аналогично расчету частоты отказов в соответствии с выражением (5.6), но относительно среднего числа работоспособных объектов в рассматриваемом интервале времени от  $(t - \Delta t/2)$  до  $(t + \Delta t/2)$ :

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}}\Delta t}, \quad (5.9)$$

где  $N_{\text{ср}} = (N_i + N_{i+1})/2$ ;  $N_i + N_{i+1}$  – число работоспособных объектов соответственно в начале и в конце интервала  $\Delta t$ .

Между рассмотренными показателями безотказности существуют однозначные зависимости.

Интегрируя выражение (5.8), получим:

$$-\int_0^t \lambda(t) dt = \ln P(t) \Big|_0^t;$$
$$P(t) = \exp \left[ -\int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (5.10)$$

Из формул (5.3) и (5.6) следует

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (5.11)$$

Таким образом, по математическому определению одного показателя надежности можно найти три другие. Действительно, если известна, например, функция  $f(t)$ , то по уравнению (5.11) можно определить  $P(t)$ , а по уравнению (5.8) –  $\lambda(t)$ . Если известна функция  $\lambda(t)$ , то по уравнению (5.10) находят  $P(t)$ , а затем по (5.6) –  $f(t)$ .

Следовательно, для характеристики безотказности невосстанавливаемых объектов показатели  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$  являются равноправными. Однако на практике предпочтение отдают интенсивности отказов  $\lambda(t)$ .

В качестве еще одного показателя безотказности невосстанавливаемых объектов используют среднюю наработку до отказа  $T_1$ .

Средняя наработка до отказа представляет собой математическое ожидание случайной величины  $T$  – времени работы объекта до первого отказа.

Математическая оценка

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (5.12)$$

Статистическая оценка

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (5.13)$$

где  $t_i$  – продолжительность работы каждого  $i$ -го объекта из  $N$  объектов, поставленных на испытание, до первого отказа.

## 5.2 Показатели безотказности восстанавливаемых объектов

В качестве показателей безотказности восстанавливаемых объектов обычно используют параметр потока отказов  $\omega(t)$  и среднюю наработку на отказ  $T_0$ .

Параметр потока отказов – математическое ожидание числа отказов восстанавливаемого объекта в единицу времени, взятое для рассматриваемого момента времени. Математическая оценка параметра потока отказов определяется как предел отношения вероятности появления хотя бы одного отказа за промежуток времени  $\Delta t$  к данному промежутку при  $\Delta t \rightarrow 0$ , т. е.

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_1(t, t + \Delta t)}{\Delta t}. \quad (5.14)$$

Некоторые авторы называют показатель  $\omega(t)$  средней частотой отказов. Его статистическая оценка рассчитывается по результатам опыта как отношение числа объектов  $n(\Delta t)$ , отказавших в единицу времени в интервале  $\Delta t$  от  $(t - \Delta t/2)$  до  $(t + \Delta t/2)$ , к общему количеству испытываемых объектов при условии, что отказавшие объекты немедленно восстанавливаются или заменяются новыми:

$$\hat{\omega}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t}. \quad (5.15)$$

Для сложных восстанавливаемых объектов, потоки отказов которых можно рассматривать как стационарные потоки случайных событий,  $\lambda = \text{const}$ , а значение  $\omega$  и  $\lambda$  численно совпадают, т. е.  $\omega(t) = \lambda(t) = \lambda = \omega$ .

Средняя наработка на отказ представляет собой математическое ожидание продолжительности работы восстанавливаемого объекта между соседними отказами.

Математическая оценка

$$T_0 = \frac{t}{M[n(t)]}, \quad (5.16)$$

где  $t$  – суммарная наработка восстанавливаемого объекта на интервале наблюдения;  $M[n(t)]$  – математическое ожидание числа отказов в течение наработки  $t$ .



Статистическая оценка

$$\hat{T}_0 = \frac{t}{n(t)}. \quad (5.17)$$

Если имеется информация по группе одинаковых объектов, находящихся в однородных условиях, достоверность оценки  $\hat{T}_0$  может быть повышена в соответствии с выражением

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \hat{T}_{0j}, \quad (5.18)$$

где  $\hat{T}_{0j}$  – средняя наработка на отказ каждого  $j$ -го из  $N$  рассматриваемых объектов, рассчитанная по формуле (5.17).

Иногда при исследовании надежности восстанавливаемых объектов используется такой показатель, как вероятность безотказной работы в интервале времени  $(t_1, t_2)$ .

Для ординарных потоков отказов без последствия он определяется из выражения

$$P(t_1, t_2) = \exp \left[ - \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt \right]. \quad (5.19)$$

Для стационарных потоков отказов, т. е. при  $\omega(t) = \omega = \lambda$ ,

$$P(t_1, t_2) = \exp[-\lambda(t_2 - t_1)]. \quad (5.20)$$

### 5.3 Показатели долговечности и сохраняемости

*Средний срок службы* – математическое ожидание срока службы. Под *сроком службы* объекта понимается календарная продолжительность его эксплуатации с учетом технического обслуживания, восстановления и возобновления эксплуатации после ремонтов до перехода в предельное состояние.

Срок службы не следует отождествлять с безотказностью. Так, объект, представляющий собой сложную систему, может за время эксплуатации иметь большое число отказов, т. е. характеризоваться относительно низкими показателями безотказности, и в то же время находиться в эксплуатации в течение длительного времени. Это объясняется тем, что срок службы сложного объекта определяется не сроком

службы его элементов, а зависит в основном от уровня их восстанавливаемости и технического обслуживания.

Заводы-изготовители часто приводят такой показатель, как гарантийный срок службы, который всегда меньше среднего срока службы. Он не характеризует надежность объекта, а лишь устанавливает ответственность поставщика перед потребителем.

Основное значение показателя «средний срок службы» заключается в том, что он определяет временной интервал, в котором оценивается надежность объекта.

Его статистическая оценка может быть получена по результатам наблюдений за группой одинаковых объектов в однородных условиях эксплуатации как среднее арифметическое их сроков службы.

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

*Средний ресурс* – математическое ожидание ресурса, т. е. общей наработки объекта от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние.

Отличие этого показателя от среднего срока службы заключается в том, что в данном случае суммируются лишь интервалы времени работы объекта по назначению без учета всякого рода простоев. Используется он обычно для характеристики надежности объектов ответственного назначения, у которых ведется контроль продолжительности работы, величины пробега, числа рабочих циклов и т. п.

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

Гамма-процентные показатели определяются как корни  $t_\gamma$  уравнения вида (функция распределения ресурсов или срока службы объекта)

$$F(t) = 1 - 0,01\gamma. \quad (5.21)$$

Показатели сохраняемости по своей сути аналогичны показателям долговечности. Различие заключается в том, что они обеспечивают оценку способности объекта сохранять работоспособное состояние в период после изготовления и до начала эксплуатации.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости, т. е. продолжительности хранения объекта в расчетных условиях до перехода его в предельное или неработоспособное состояние.

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок, достигаемый с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Рассчитывается по выражению, аналогичному (5.21).

#### 5.4 Показатели ремонтпригодности

В наибольшей степени ремонтпригодность определяет надежность сложных объектов длительного использования. Для них предусматривается система проведения технического обслуживания, включающая не только профилактические мероприятия типа чистки, смазки, замены изношенных деталей и т. п., но и выявление и устранение причин отказов путем замены или ремонта отказавших элементов, т. е. непосредственно восстановление.

Уровень ремонтпригодности в конечном итоге определяется затратами на профилактику и восстановление, а также потерями, связанными с вынужденными простоями объекта. Снижение таких затрат обеспечивается рациональным конструктивным исполнением объекта и составляющих его элементов, а также использованием эффективных методов и средств диагностирования. Поскольку затраты на проведение профилактических мероприятий могут быть определены достаточно точно на весь период эксплуатации объекта, наиболее важными в оценке ремонтпригодности являются показатели, характеризующие приспособленность объекта к восстановлению.

В качестве основной характеристики этого свойства обычно принимают случайную величину – продолжительность, или время восстановления  $T_v$ . В общем случае  $T_v$  включает в себя следующие интервалы времени:  $T_c$  – от момента скрытого отказа до начала диагностирования,  $T_d$  – от начала диагностирования до установления факта отказа,  $T_{пд}$  – поиск причины и места отказа (дефекта),  $T_p$  – непосредственно восстановление объекта (ремонт или замена отказавшего элемента).

При проведении расчетов надежности обычно принимают  $T_v = T_{пд}$  или  $T_v = T_p$  в зависимости от соотношения  $T_{пд}$  и  $T_p$ , характерного для конкретного объекта.

Поскольку  $T_v$  – величина случайная, для оценки уровня восстанавливаемости используются вероятностные показатели, аналогичные рассмотренным ранее.

*Вероятность восстановления* – вероятность того, что отказавший объект будет восстановлен в течение заданного времени  $t$ .

Этот показатель представляет собой функцию распределения времени восстановления, его математическая оценка

$$S(t) = P(T_B < t). \quad (5.22)$$

Статистическая оценка

$$\hat{S}(t) = \frac{n_B(t)}{N_B}, \quad (5.23)$$

где  $N_B$  – число объектов, поставленных на восстановление;  $n_B(t)$  – число объектов, восстановленных за время  $t$ .

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для момента времени  $t$  при условии, что до этого момента восстановление объекта не произошло.

Математическая оценка

$$\mu(t) = \frac{f_B(t)}{1 - S(t)} = \frac{dS(t)}{dt} \frac{1}{1 - S(t)}, \quad (5.24)$$

где  $f_B(t)$  – плотность распределения времени восстановления.

Статистическая оценка

$$\hat{\mu}(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{\text{нв ср}} \Delta t}, \quad (5.25)$$

где  $n_B(\Delta t)$  – число объектов, восстановленных в интервале времени  $\Delta t$  от  $(t - \Delta t/2)$  до  $(t + \Delta t/2)$ ;  $N_{\text{нв ср}}$  – среднее число объектов, не восстановленных в интервале  $\Delta t$ ,

$$N_{\text{нв ср}} = \frac{N_{\text{нв } i} + N_{\text{нв}(i+1)}}{2},$$

где  $N_{\text{нв } i}, N_{\text{нв}(i+1)}$  – число объектов, не восстановленных соответственно в начале и в конце интервала  $\Delta t$ .

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после его отказа.

$$T_{\text{в ср}} = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - S(t)] dt. \quad (5.26)$$

Статистическая оценка

$$\hat{T}_{\text{в ср}} = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} t_{Bi}, \quad (5.27)$$

где  $t_{bi}$  – длительность восстановления каждого  $i$ -го объекта из числа  $N_b$  объектов, поставленных на восстановление.

## 5.5 Комплексные показатели надежности

Комплексными называются показатели, определяющие количественную характеристику двух или нескольких составляющих частей надежности.

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

Статистическая оценка

$$\hat{K}_r = \frac{t_{pc\Sigma}}{t_{pc\Sigma} + t_{b\Sigma}}, \quad (5.28)$$

где  $t_{pc\Sigma}$  – суммарное время нахождения объекта в работоспособном состоянии;  $t_{b\Sigma}$  – суммарное время восстановления объекта.

Учитывая, что  $t_{pc\Sigma} = T_0 n$ , а  $t_{b\Sigma} = T_{в ср} n$ , где  $n$  – число отказов на интервале времени, для которого определяются значения  $t_{pc\Sigma}$  и  $t_{b\Sigma}$ , формулу (5.28) можно представить в виде

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_{в ср}}. \quad (5.29)$$

Выражение (5.29) находит широкое применение в инженерной практике. Степень его приближения к истинному значению  $K_r$  тем больше, чем больше интервал времени, на котором определяются  $t_{pc\Sigma}$  и  $t_{b\Sigma}$ . При этом потоки отказов и восстановлений становятся установившимися и  $K_r$  приобретает стационарный характер.

Коэффициент оперативной готовности  $K_{ог}$  характеризует надежность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа в течение некоторого заданного интервала времени.

Он представляет собой вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени  $t$ , кроме планируемых перерывов в работе, и начиная с этого момента проработает безотказно в течение заданного времени  $\tau$ .

## Математическая оценка

$$K_{\text{ор}}(t, \tau) = K_r(t)P(\tau), \quad (5.30)$$

где  $P(\tau)$  – вероятность безотказной работы объекта в интервале заданного времени  $\tau$ .

### Статистическая оценка

$$\hat{K}_{\text{ор}}(t, \tau) = \frac{N(t, \tau)}{N}, \quad (5.31)$$

где  $N(t, \tau)$  – число объектов из общего их количества  $N$ , работоспособных в момент времени  $t$  и безотказно проработавших в течение времени  $\tau$ .

Коэффициент технического использования  $K_{\text{ти}}$  характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации. Его статистическая оценка

$$\hat{K}_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{рс}\Sigma}}{t_{\text{рс}\Sigma} + t_{\text{нр}\Sigma}}, \quad (5.32)$$

где  $t_{\text{нр}\Sigma}$  – суммарное время всех простоев объекта, связанных с его диагностированием, восстановлением, профилактическим обслуживанием и пр.

## **Контрольные вопросы**

1. Приведите классификацию показателей надежности.
2. Приведите показатели безотказности невосстанавливаемых объектов.
3. Приведите показатели безотказности восстанавливаемых объектов.
4. Приведите показатели долговечности и сохраняемости объектов.
5. Разъясните смысл гамма-процентных показателей.
6. Сравните понятия «средний срок службы» и «срок службы».
7. Сравните понятия «срок службы» и «гамма-процентный срок службы».
8. Охарактеризуйте критерий уровня ремонтпригодности.
9. Охарактеризуйте коэффициент готовности.
10. Охарактеризуйте коэффициент оперативной готовности.
11. Охарактеризуйте коэффициент технического использования.

## 6 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ

### 6.1 Системы как объект надежности и их основные свойства

Большое значение имеет исследование различных процессов, действующих на этапе применения создаваемых технических средств, с учетом прогноза их потребительских свойств, условий эксплуатации и др. Эти исследования проводят с использованием методов математического моделирования. При этом технические средства и связи между ними рассматривают как некоторую систему, изучаемую на основе ее математической модели.

У систем как объектов исследования различают три группы свойств, каждую из которых используют в самостоятельном аспекте исследования.

1. *Взаимодействие с окружающей средой* (контуры обмена, «входы» и «выходы» системы). В первую очередь представляет интерес т. н. целевой контур обмена, характеризующий процесс удовлетворения потребности (выходной эффект, получаемый от системы).

Для технических систем, в частности, целевым является контур обмена потребляемых ресурсов на конечный результат – готовую продукцию. Кроме целевого контура при исследовании систем могут рассматриваться и другие контуры обмена: контур обеспечения работоспособности, контур контроля функционирования и др.

2. *Внутреннее строение* («структура»), под которым понимают совокупность элементов и множество устойчивых связей между ними.

Понятие «структура системы» охватывает все, что определяет логику ее функционирования, позволяет формально описать, смоделировать функционирование системы и на основе этого прогнозировать ее поведение.

3. *Общесистемные интегральные качества* («поведение») системы, которые в общем случае могут не выражаться через свойства входящих в систему элементов:

– потребительская ценность системы – определяется целевым контуром и является исходным при введении понятия «эффективность». Эффективность обычно трактуют как выгодность целевого обмена (близость достигаемого результата предельно выгодному);

– самоорганизация – этим качеством обладают системы большой сложности, способные самопроизвольно изменять свой внутренний порядок, организованность, структуру, параметры, ориентацию поведения в сложной изменяющейся обстановке. Принципиально важными

являются способности к распознаванию ситуаций, адаптации, самообучению, наличие свободы выбора решений и др.;

– управляемость, т. е. способность системы подчиняться управляющим воздействиям;

– устойчивость – может объединять различные свойства: прочность, стойкость к воздействию возмущающих внешних факторов, защищенность, надежность, живучесть и др. Иногда выделяют информационную устойчивость как самостоятельную группу свойств систем.

Техническая система как объект надежности может находиться в одном из следующих технических состояний: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное.

Типичные критерии отказа технических систем:

1) несоответствие показателей качества продукции установленным требованиям;

2) снижение производительности ниже установленного уровня;

3) прекращение функционирования технической системы, вызванное отказом одного из элементов или внешними факторами (например, прекращение энергоснабжения);

4) превышение нормативов по трудоемкости, энергоемкости, расходу материалов, запасных частей и т. п.

Элементы систем с позиций анализа надежности обладают следующими особенностями:

– элемент выделяется в зависимости от поставленной задачи и может быть достаточно сложным по конструкции;

– показатели надежности элемента относятся к нему в целом, а не к его составным частям;

– возможно восстановление работоспособности элемента независимо от других элементов системы.

Выходные параметры элементов системы по их влиянию на формирование выходного параметра  $X_{\Sigma}$  системы в целом могут быть разделены на три группы (рисунок 6.1):

$X_1$  – изменение выходного параметра элемента оказывает влияние только на работоспособность самого элемента;

$X_2$  – параметр участвует в формировании одного или нескольких выходных параметров системы в целом; его изменения должны учитываться в совокупности с изменениями параметров данной категории других элементов системы;

$X_3$  – параметр влияет на работоспособность других элементов системы; его изменение для отдельных частей системы аналогично изменению внешних условий работы.



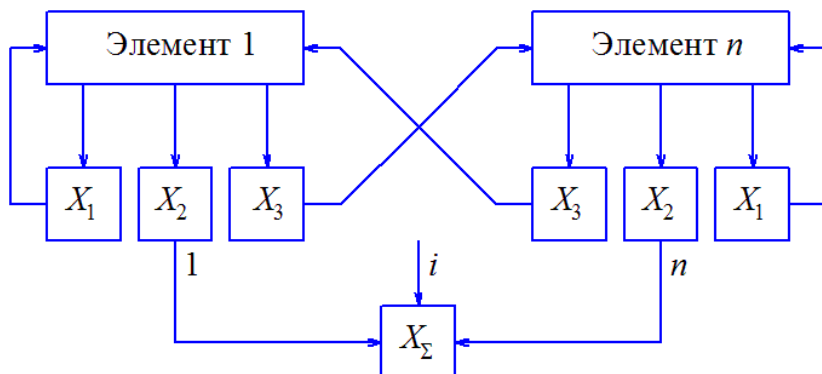


Рисунок 6.1 – Выходные параметры элементов систем

Следует отметить, что каждый выходной параметр элемента системы может обладать одновременно несколькими из перечисленных свойств.

С точки зрения надежности системы могут иметь следующие виды структур.

1. *Расчлененная структура.* Показатели надежности элементов систем с расчлененной структурой формируются независимо и могут быть заранее определены, т. к. отказы элементов в таких системах рассматриваются как случайные события, независимые от состояния других элементов системы. Все элементы расчлененных систем имеют только выходные параметры типа  $X_1$ , т. е. влияющие лишь на работоспособность самого элемента.

2. *Связанная структура.* Такой вид структуры имеют системы, в которых отказы отдельных элементов являются случайными событиями, вероятность которых зависит от состояния других элементов (элементы имеют выходные параметры типа  $X_3$ ). Поэтому необходимо рассматривать систему в целом, а также учитывать участие каждого элемента, имеющего выходные параметры типа  $X_2$ , в формировании выходных параметров системы в целом.

3. *Комбинированная структура.* Такие системы можно рассматривать как расчлененные, состоящие из подсистем со связанной структурой и независимым формированием показателей надежности для каждой из подсистем.

При возможности расчленения сложной системы на отдельные элементы, для каждого из которых можно определить показатели надежности, для расчета надежности системы используются структурные схемы – модели надежности систем. Чаще всего структурная схема

системы, построенная для решения задач надежности, не совпадает с функциональной схемой системы или конструктивной схемой соединения ее элементов. Модель надежности системы строится на основе анализа влияния определенного виде отказов элементов на надежность системы в целом.

В качестве примера, поясняющего разницу между конструктивной схемой и моделью надежности, рассмотрим подсистему из двух масляных фильтров (таблица 6.1), которые для повышения надежности гидросистемы могут быть подключены последовательно или параллельно.

Таблица 6.1 – Конструктивная и структурная схемы при разных видах отказов

Конструктивная схема	Структурная схема	
	засорение сетки	разрыв сетки

Отказ фильтра может произойти в результате двух основных причин – засорения сетки или ее разрыва. В случае засорения сетки структурная схема соответствует конструктивной. Последовательное соединение фильтров в этом случае только снизит надежность системы, т. к. отказ любого из фильтров приведет к отказу системы (необходимый поток жидкости не будет проходить через систему).

При отказе фильтров по разрыву сетки структурная схема противоположна конструктивной. При параллельном конструктивном соединении отказ любого фильтра будет означать отказ системы, т. к. при разрыве сетки поток жидкости пойдет через этот фильтр, и не будет происходить ее фильтрования, что соответствует последовательному соединению элементов на структурной схеме. При последовательном конструктивном включении фильтров, наоборот, разрыв сетки одного из них не будет означать отказа, поскольку второй фильтр продолжит выполнять свои функции, что соответствует параллельному соединению на структурной схеме.

*Принципы расчета структурно-сложных систем.* Современные технические системы относятся к категории структурно-сложных. Характерным признаком таких систем является зависимость их безотказности как от надежности элементов, так и от вида их логических структурных связей. При этом отказ системы зависит не только от числа отказавших элементов, но и от места их расположения в общей структуре.

При расчетах надежности выделяют три основных типа структурно-сложных систем: с последовательно-параллельными связями, со связями мостикового типа и с перекрестными связями.

В общем случае оценка их надежности осуществляется следующим образом. Если система состоит из  $n$  элементов, каждый из которых может находиться в одном из двух состояний (работоспособном или неработоспособном), то общее число ее возможных состояний составляет  $n^2$ . Это множество состояний разбивается на два подмножества: работоспособное и неработоспособное, после чего рассчитываются вероятности пребывания системы в работоспособных состояниях и вероятность ее безотказной работы. Однако реализация такого метода на практике связана со значительными трудностями, в частности, при выделении работоспособных и неработоспособных состояний. Поэтому обычно используют методы, заключающиеся в преобразовании структуры исследуемой системы к более простым видам, для которых возможно получение удобных аналитических выражений показателей надежности.

Так, например, при расчете надежности системы с последовательно-параллельной структурой весьма эффективным является метод свертки, который основан на последовательном эквивалентном объединении групп элементов с последовательным и параллельным соединением с целью приведения исходной структуры к схеме с основным соединением эквивалентных элементов (рисунк 6.2).

Упрощение связей мостикового типа (рисунк 6.3, вверху) производят обычно с использованием метода преобразования «треугольника» в «звезду» (рисунк 6.3, в середине) и обратно.

Вероятности отказов элементов полученных эквивалентных по надежности схем рассчитывают по формулам:

$$q_a \approx q_1 q_3; q_b \approx q_2 q_1; q_c \approx q_3 q_2;$$

$$q_1 \approx \sqrt{\frac{q_a q_b}{q_c}}; q_2 \approx \sqrt{\frac{q_b q_c}{q_a}}; q_3 \approx \sqrt{\frac{q_c q_a}{q_b}}.$$

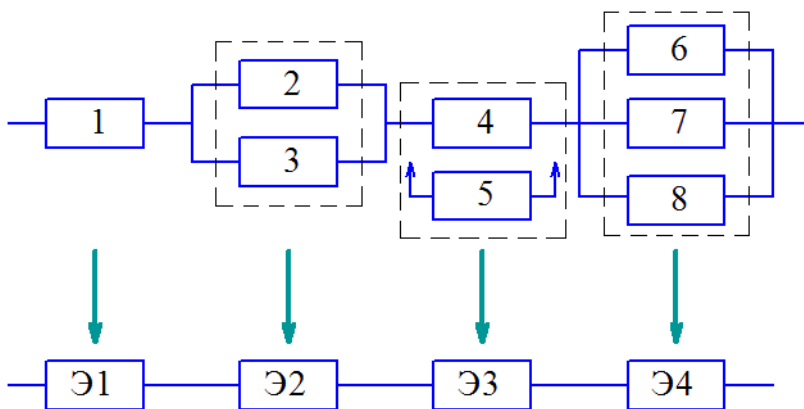


Рисунок 6.2 – Приведение исходной структуры к схеме с основным соединением эквивалентных элементов

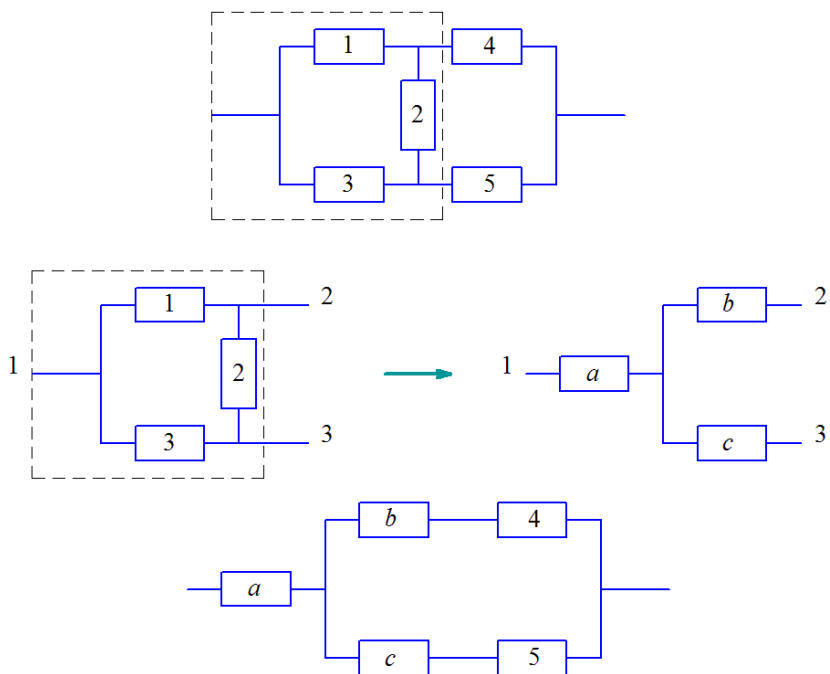


Рисунок 6.3 – Преобразование схемы мостикового типа в последовательно-параллельную

Целью таких преобразований является приведение схем с узлами мостикового типа к схемам последовательно-параллельным с последующей их сверткой.

***Краткие замечания, касающиеся проблем анализа надежности систем.***

1. Существующие в настоящее время аналитические методы расчета и анализа надежности технических систем с произвольными распределениями отказов, случайных параметров и восстановлений элементов обладают следующими недостатками:

- методы сложные, не доведены до машинных алгоритмов и программ;
- позволяют анализировать системы только простой структуры;
- отсутствует единая математическая модель надежности функционирования систем;
- невозможность исследования зависимых процессов;
- трудности исследования нестационарных характеристик надежности;
- сложность, а часто и невозможность учета таких особенностей функционирования систем, как наличие структурной и временной избыточности, контроль состояния элементов, наличие нескольких видов отказов, существование скрытых отказов и т. д.;
- невозможность анализа систем с переменной структурой.

В связи с указанными обстоятельствами оценка надежности и эффективности функционирования сложных систем требует разработки новых подходов и методов анализа, учитывающих сложность системы и все многообразие ее отличительных особенностей.

2. Известные в настоящее время методы расчета надежности технических средств не позволяют оценить погрешности вычисления показателей надежности с необходимой для практики точностью. Более того, при надлежащем выборе законов распределения показатели надежности, полученные асимптотическими методами, могут совершенно исказить истинное значение показателей даже при дополнительном условии «быстрого» восстановления элементов.

3. Аналитические методы являются исключительно важными для исследования надежности реальных технических систем, поскольку для большого количества факторов, влияющих на надежность систем, высокая достоверность имитационного моделирования практически недостижима.

4. Использование экспоненциальных законов при анализе надежности реальных технических систем длительного функционирования в

принципе неправомерно, т. к. исходные посылки в моделях не адекватны физическим процессам, протекающим в системах. При решении практических задач указанная идеализация реальных процессов отказов и восстановлений может приводить к существенным ошибкам.

5. При разработке математической модели функционирования сложной технической системы и методов ее анализа, как правило, сталкиваются с необходимостью учета важных особенностей ее функционирования, таких как контроль состояния элементов, последствие отказов, переключение на резерв, возможность реконфигурации системы во время ее эксплуатации, введение различных видов резервирования, наличие интервалов простоя элементов и т. д. Случайные параметры, характеризующие указанные особенности, обычно являются «неэкспоненциальными».

6. Традиционные методы ограничены возможностью анализировать надежность и эффективность функционирования технических систем с малым числом состояний (несколько десятков). Решение задач в случае систем с большим числом состояний (порядка сотен тысяч и более) требует разработки нестандартных подходов.

7. В настоящее время отсутствуют не только инженерные методы, но и теоретические разработки анализа надежности технических систем с переменной структурой, обусловленной ее многофункциональностью. Анализ надежности систем со статической и динамической реконфигурацией структуры представляет собой новое направление в теории надежности сложных технических систем.

8. Отсутствие инженерных методов анализа надежности сложных систем, учитывающих их свойства и особенности функционирования, объясняется следующими причинами: неадекватностью моделей физическим процессам, математическими трудностями, отсутствием статистических данных по надежности элементов.

## **6.2 Надежность невосстанавливаемых объектов**

Определение показателей надежности сложной системы осуществляется по известным показателям отдельных элементов и структуре системы, т. е. характеру связей между элементами с точки зрения надежности.

Наиболее простую структуру имеет система, состоящая из  $n$  элементов, у которой отказ одного из элементов приводит к отказу всей системы (рисунок 6.4). В этом случае система имеет логически последовательное соединение элементов (т. н. основное соединение).

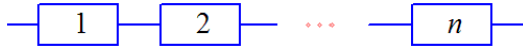


Рисунок 6.4 – Логически последовательное соединение элементов

При расчете показателей надежности таких устройств предполагается, что отказ элемента является событием случайным и независимым.

Тогда вероятность безотказной работы изделия в течение времени  $t$  равна произведению вероятностей безотказной работы ее элементов в течение того же времени. Т. к. как вероятность безотказной работы элементов в течение времени  $t$  можно выразить через интенсивность отказов в виде (5.9), то расчетные формулы для вероятности безотказной работы технического устройства при последовательном соединении элементов можно записать следующим образом:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \exp \left[ - \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \lambda_i(t) dt \right]. \quad (6.1)$$

Выражение (6.1) наиболее общее. Оно позволяет определить вероятность безотказной работы изделия до первого отказа при любом законе изменения интенсивности отказов во времени.

На практике часто интенсивность отказов изделий является величиной постоянной. При этом время возникновения отказов подчинено экспоненциальному закону распределения, т. к. для нормального периода эксплуатации справедливо условие  $\lambda = \text{const}$ .

В этом случае выражения для количественных характеристик примут вид:

$$P(t) = \exp(-\lambda_c t); \lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i; T_1 = \frac{1}{\lambda_c}; f(t) = \lambda_c \exp(-\lambda_c t). \quad (6.2)$$

Если все элементы данного типа равнонадежны, интенсивность отказов будет

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i, \quad (6.3)$$

где  $N_i$  – число элементов  $i$ -го типа;  $r$  – число типов элементов.

На практике часто приходится вычислять вероятность безотказной работы высоконадежных систем. При этом произведение  $\lambda_c t$  значительно меньше единицы, а вероятность безотказной работы  $P(t)$  близка к единице. В этом случае показатели надежности можно с достаточной для практики точностью вычислить по следующим приближенным формулам:

$$P(t) = 1 - \lambda_c t; f(t) = \lambda_c(1 - \lambda_c t). \quad (6.4)$$

Вычисление количественных характеристик надежности по приближенным формулам не дает больших ошибок для систем, вероятность безотказной работы которых превышает 0,9, т. е. для  $\lambda t \leq 0,1$ .

При расчете показателей надежности систем часто приходится перемножать вероятности безотказной работы отдельных элементов, возводить их в степень и извлекать корни. При значениях вероятностей  $P(t)$ , близких к единице, эти вычисления можно с достаточной для практики точностью выполнить по следующим приближенным формулам:

$$P(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^n q_i(t); P(t) = p_i^n(t) \approx 1 - nq_i(t); \sqrt[n]{p_i(t)} \approx 1 - \frac{q_i(t)}{n}.$$

где  $q_i(t)$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента.

В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на работу изделия, различают прикидочный, ориентировочный и окончательный расчет показателей надежности.

Прикидочный расчет основывается на следующих допущениях:

- все элементы изделия равнонадежны;
- интенсивность отказов всех изделий не зависит от времени, т. е.

$\lambda = \text{const}$ ;

- отказ любого элемента приводит к отказу всего изделия.

Прикидочный расчет показателей надежности выполняется в следующий случаях:

- при проверке требований по надежности, выдвинутых заказчиком в техническом задании на проектирование изделия;
- при расчете нормативных данных по надежности отдельных блоков и устройств системы;
- для определения минимально допустимого уровня надежности элементов проектируемого изделия;



– при сравнительной оценке надежности отдельных вариантов изделия на этапе эскизного проектирования.

Прикидочный расчет показателей надежности позволяет судить о принципиальной возможности обеспечения требуемой надежности изделия.

Ориентировочный расчет показателей надежности учитывает влияние на надежность только количества и типов, входящих в систему элементов, и основывается на следующих допущениях:

– все элементы данного типа равнонадежны, т. е. величины интенсивности отказов ( $\lambda_i$ ) для этих элементов одинаковы;

– все элементы работают в номинальном (нормальном) режиме, предусмотренном техническими условиями;

– интенсивности отказов всех элементов не зависят от времени, т. е. в течение срока службы у элементов, входящих в изделие, отсутствует старение и износ, следовательно  $\lambda_i(t) = \text{const}$ ;

– отказы элементов изделия являются событиями случайными и независимыми;

– все элементы изделия работают одновременно.

Для определения показателей надежности изделия необходимо знать:

– вид соединения элементов расчета надежности;

– типы элементов, входящих в изделие и число элементов каждого типа;

– величины интенсивностей отказов элементов  $\lambda_i$ , входящих в изделие.

Выбор  $\lambda_i$  для каждого типа элементов производится по соответствующим таблицам, приведенных в справочниках по надежности.

Таким образом, при ориентировочном расчете показателей надежности необходимо знать структуру системы, номенклатуру применяемых элементов и их количество.

Ориентировочный метод расчета показателей надежности используется на этапе эскизного проектирования после разработки принципиальных схем изделий. Он позволяет наметить пути повышения надежности изделия и производится по формулам (6.2)–(6.3).

Полный расчет показателей надежности изделия выполняется тогда, когда известны реальные режимы работы элементов после испытания в лабораторных условиях основных узлов и макетов изделия.

Выполнение окончательного расчета показателей надежности возможно только при наличии данных о коэффициентах нагрузки отдельных элементов и при наличии графиков зависимости интенсивно-

сти отказов элементов от их нагрузки, температуры окружающей среды и других факторов.

Эти зависимости приводятся в виде графиков либо их можно считать с помощью т. н. поправочных коэффициентов интенсивности отказов  $k_i$ , позволяющих учесть влияние различных факторов на надежность изделия.

Для определения показателей надежности изделия необходимо знать:

- число элементов с разбивкой их по типам и режимам работы;
- зависимости интенсивности отказов элементов  $\lambda_i$  от режима работы и заданных внешних условий;
- структуру системы.

Знание зависимости интенсивности отказов  $\lambda_i$  от воздействующих факторов является необходимым для определения режима работы элементов с целью получения заданной вероятности безотказной работы за время  $t$ .

Интенсивность отказов элементов при эксплуатации в реальных условиях  $\lambda_i$  равна номинальной интенсивности отказов  $\lambda_{ni}$ , умноженной на поправочные коэффициенты  $k_i$ , зависящие от различных воздействующих факторов:

$$\lambda_i = \lambda_{ni} \prod_{i=1}^n k_i,$$

где  $\lambda_{ni}$  – интенсивность отказов элемента, работающего в нормальных условиях при номинальной нагрузке.

Полный расчет показателей надежности применяется на этапе технического проектирования изделия.

### 6.3 Надежность восстанавливаемых объектов

Особенность расчета восстанавливаемых систем по сравнению с невозстанавливаемыми заключается в необходимости учета дисциплины обслуживания (очередности восстановления), наличия последствий отказов, большого числа состояний системы, сложности структурной схемы надежности. Резервированная восстанавливаемая система в произвольный момент времени находится в одном из двух состояний: работоспособном  $S_0$  или неработоспособном  $S_1$ . Процесс ее функционирования можно отразить графом состояний (рисунок 6.5).

Граф состояний технической системы – одна из графических форм модели надежности технической системы, в которой возможные

состояния системы изображаются в виде прямоугольников (кружков, точек), а возможные направления переходов из одного состояния в другое изображаются в виде стрелок, которые соединяют между собой прямоугольники. У стрелок проставляют переходные вероятности или интенсивности переходов из одного состояния в другое. Такой граф называют размеченным графом состояний.

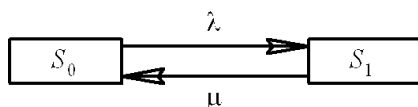


Рисунок 6.5 – Граф состояний восстанавливаемой системы

Граф состояний геометрически изображает возможные состояния объектов и его возможные переходы из состояния в состояние.

Из состояния  $S_0$  в состояние  $S_1$  система переходит в результате отказов с интенсивностью  $\lambda$ , а из состояния  $S_1$  в состояние  $S_0$  переходит в результате восстановления с интенсивностью  $\mu$ .

При экспоненциальных законах распределения времени наработки и времени восстановления случайный процесс работы восстанавливаемой системы после истечения некоторого времени стабилизируется ( $\lambda = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ ) и вероятность застать систему работоспособной в произвольный момент времени остается постоянной. Система с указанным свойством называется *эргодической*, а сам процесс – *марковским случайным процессом* с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Случайный процесс называется марковским, если для любого момента времени вероятности всех состояний системы в будущем зависят только от ее состояния в настоящем и не зависят от того, когда и как система перешла в это состояние. Переход системы из состояния в состояние происходит под влиянием потоков отказов и восстановлений. Случайный процесс называется дискретным, если его состояния можно пронумеровать и переход системы из состояния в состояние происходит мгновенно, т. е. скачкообразно.

Для определения вероятности нахождения восстанавливаемой системы в состояниях  $S_0$  или  $S_1$  в любой момент времени применяется система дифференциальных уравнений Колмогорова, которая составляется по следующим правилам:

- число уравнений равно числу возможных состояний рассматриваемой системы;

– производная искомой вероятности состояния равна сумме стольких слагаемых, сколько стрелок на графе состояний связано с этим состоянием;

– каждое слагаемое равно произведению интенсивности потока событий, переводящих систему по данной стрелке, на вероятность того состояния, из которого исходит стрелка;

– слагаемое имеет знак минус, если стрелка исходит из данного состояния, и знак плюс – если стрелка направлена в данное состояние.

Система дифференциальных уравнений Колмогорова для нерезервированной восстанавливаемой системы

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \end{cases}.$$

Система уравнений дополняется нормирующим условием

$$P_0(t) + P_1(t) = 1.$$

Решение системы уравнений при начальных условиях  $P_0(t=0) = 1$  и  $P_1(t=0) = 0$  (в начальный момент система работоспособна) имеет вид

$$\begin{cases} P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \\ P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \end{cases}.$$

Если система в начальный момент неработоспособна  $P_0(t=0) = 0$  и  $P_1(t=0) = 1$  тогда решением системы уравнений будет

$$\begin{cases} P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \\ P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \end{cases}.$$

При  $t \rightarrow \infty$  независимо от начального состояния системы вероятности  $P_0(t)$  и  $P_1(t)$  стремятся к постоянным величинам

$$P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}.$$

Основным показателем надежности нерезервированной восстанавливаемой системы является коэффициент готовности  $K_r$ . Он в начальный период эксплуатации примерно равен вероятности безотказной работы  $P_0(t)$ , а вероятность  $P_1(t)$  равна вероятности отказа  $Q(t)$ . Поэтому, если в начальный момент система была неработоспособна, то коэффициент готовности примерно равен вероятности восстановления  $K_r = \mu t$ , а вероятность  $P_1(t) = 1 - \mu t$  – вероятности отсутствия восстановления.

**Расчет надежности резервированных восстанавливаемых систем.** В качестве примера рассмотрим метод расчета показателей надежности для двух способов резервирования систем: общее постоянное резервирование, общее резервирование замещением. Структурные схемы надежности для указанных систем показаны на рисунке 6.6.

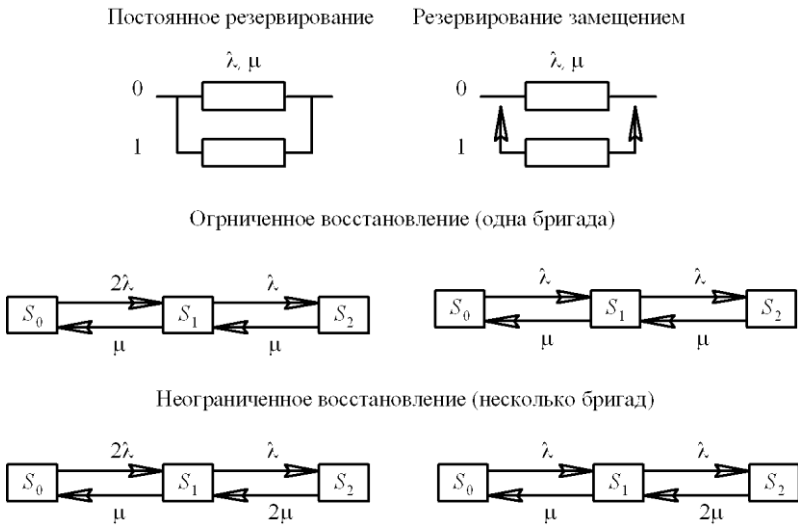


Рисунок 6.6 – Граф состояний резервированной восстанавливаемой системы

Применяя теорию марковских процессов, для каждого состояния записывают системы дифференциальных уравнений Колмогорова. Решая уравнения для заданных параметров потока отказов и восстановлений, определяют значения вероятностей нахождения систем в различных состояниях:  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ . Зная величины вероятностей  $P_0$ ,  $P_1$ , определяют коэффициент готовности  $K_r = P_0 + P_1$ .

### ***Контрольные вопросы***

1. Охарактеризуйте группы свойств систем.
2. Охарактеризуйте типичные критерии отказа технических систем.
3. Классифицируйте выходные параметры элементов системы по их влиянию на формирование выходного параметра.
4. Охарактеризуйте виды структуры систем с точки зрения надежности.
5. Сравните конструктивную и надежностьную структурную схемы системы при разных видах отказов.
6. Охарактеризуйте метод свертки структурно-сложных систем.
7. Охарактеризуйте метод преобразования схемы мостикового типа в последовательно-параллельную.
8. Приведите расчет вероятности безотказной работы невосстанавливаемых объектов.
9. Приведите расчетные зависимости надежности невосстанавливаемых объектов (время возникновения отказов подчинено экспоненциальному закону распределения).
10. Охарактеризуйте виды расчетов показателей надежности в зависимости от полноты учета факторов, влияющих на работу изделия.
11. Приведите правила формирования системы дифференциальных уравнений Колмогорова при расчете восстанавливаемых объектов.
12. Каким образом определяется коэффициент готовности нерезервированной восстанавливаемой системы?

## 7 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

### 7.1 Факторы, влияющие на надежность объектов

Методы обеспечения и повышения надежности техники можно сформулировать и научно обосновать, если проанализировать функциональные связи между показателями надежности и расчетные соотношения для показателей надежности сложных систем.

Вероятность безотказной работы невосстанавливаемой системы  $P_c(t)$  с основным соединением элементов выражается формулой

$$P_c(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda_c(t) dt \right],$$

где  $\lambda_c(t) = \sum \lambda_i(t)$  – интенсивность отказов системы, состоящей из  $n$  элементов. Из этого соотношения следует, что надежность системы  $H$  является функцией  $t, n, \lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ , т. е.  $H = f(t, n, \lambda_i)$ . Отсюда очевидно, что для обеспечения надежности необходимо: упрощать систему (уменьшать число элементов  $n$ ), снижать интенсивность отказов элементов  $\lambda_i$ , сокращать время непрерывной работы системы  $t$ .

Показателями надежности восстанавливаемых систем являются: функция готовности  $K_r(t)$ , коэффициент готовности  $K_r$ , наработка на отказ  $T$ , параметр потока отказов  $\omega(t)$ . Основной формулой определения коэффициента готовности является

$$K_r = \frac{T}{T + T_b},$$

где  $T_b$  – среднее время восстановления системы. Нарботка на отказ  $T$  зависит от показателей надежности, таких как интенсивность отказов элементов и сложность системы. Среднее время восстановления зависит от интенсивности восстановления элементов  $\mu_i$ , числа обслуживающих бригад  $k$  и дисциплины обслуживания (ДО). Таким образом, готовность системы является функцией тех же параметров, что и вероятность безотказной работы, а также параметров восстановления  $\mu_i, k$ , ДО. Тогда  $H = f(t, n, \lambda_i, \mu_i, k, \text{ДО})$ .

Отсюда очевидно, что для повышения готовности системы необходимо повышать ее ремонтпригодность (увеличивать  $\mu_i$ ) и выбирать рациональную дисциплину обслуживания (число ремонтных органов, приоритетность обслуживания).

Современные технические системы настолько сложны, а требования к их надежности столь высокие, что перечисленные выше методы часто недостаточны для удовлетворения требований к показателям надежности.

Приходится прибегать к крайним мерам – вводить избыточность в структуру системы. Избыточность может быть структурная, нагрузочная, временная, информационная. Тогда надежность системы будет зависеть от объема избыточности (кратность резервирования  $m$ ), вида резервирования (общее, раздельное), способа реализации (постоянное, замещением). Дополним нашу функциональную связь новыми параметрами (параметрами избыточности), такими как  $m$ , вид резервирования (ВР), способ реализации (СР). Тогда функция надежности будет иметь вид:  $H = f(t, n, \lambda_i, \mu_i, k, \text{ДО}, m, \text{ВР}, \text{СР})$ .

И это не все, т. к. мы не учли эксплуатацию системы, в процессе которой и расходуется надежность. В целях поддержания высокой надежности техники в процессе ее эксплуатации проводятся такие мероприятия, как профилактика, ремонт, доработка, продление ресурса. Назовем эти мероприятия условиями эксплуатации (УС). Тогда функция надежности примет вид

$$H = f(t, n, \lambda_i, \mu_i, k, \text{ДО}, m, \text{ВР}, \text{СР}, \text{УС}). \quad (7.1)$$

Таким образом, функция надежности зависит от десяти параметров (при желании их количество можно несколько увеличить), имеющих разное влияние на надежность техники. Поэтому целесообразно классифицировать их по ряду признаков. Одним из признаков может быть *период реализации*: в процессе проектирования, изготовления, эксплуатации.

Рассмотрим методы обеспечения и повышения надежности техники в процессе *проектирования*.

Пусть проектируемая система состоит из  $n = 1350$  элементов, средняя интенсивность отказов которых  $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ . Система предназначена для длительной эксплуатации. Требованием на ее надежность является  $P(250) > 0,97$ . Предположим, что справедлив экспоненциальный закон распределения времени до отказа. Тогда вероятность безотказной работы системы будет иметь значение:

$$P(250) = e^{-n\lambda t} = e^{-1350 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 250} = 0,667.$$

Надежность системы низкая, она не соответствует требованию. Какие же методы повышения надежности следует использовать для удовлетворения требований?



Обратимся к функции надежности (7.1). Т. к. система не восстанавливаема и не резервирована, то  $H = f(t, n, \lambda_i)$ . Тогда вероятность безотказной работы системы будет обеспечена при условии:  $e^{-n\lambda t} \geq 0,97$ , или  $n\lambda t \leq 0,03$ .

Обеспечить это условие можно, если  $t, n, \lambda$  будут иметь, при прочих равных условиях, значения:

$$n \leq \frac{0,03}{\lambda t} = \frac{0,03}{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 250} = 100;$$

$$\lambda \leq \frac{0,03}{nt} = \frac{0,03}{1350 \cdot 250} = 0,88 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1};$$

$$t \leq \frac{0,03}{n\lambda} = \frac{0,03}{1350 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6}} = 18,5 \text{ ч.}$$

Из этих расчетов видно, что упрощение системы, повышение надежности элементов или сокращение времени непрерывной работы системы не могут обеспечить необходимую вероятность безотказной работы, т. к. из 100 элементов вместо 1350 создать систему невозможно, уменьшить на порядок интенсивность отказов всех элементов нельзя, сократить время работы системы с 250 до 18,5 часов невозможно по техническим условиям. Вывод: применение избыточности в процессе проектирования – единственный способ обеспечения требуемой надежности.

## 7.2 Резервирование объектов

Структура объекта на начальной стадии его проектирования определяется его функциональным назначением в соответствии с требованиями технического задания и содержит минимально необходимое для этого число элементов. В процессе последующего проектирования и конструирования для достижения заданных показателей, в том числе надежности, структурная схема объекта усложняется, причем не только за счет введения дополнительных элементов, способствующих улучшению качества функционирования, но и за счет избыточности.

Избыточность – это дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций с требуемым качеством. Избыточность, вводимая с целью

повышения надежности объекта, обеспечивает его **резервирование**. Вообще, в технике резервированием называют способ повышения надежности объекта введением избыточности.

Рассмотрим основные виды резервирования.

**Структурное** или **аппаратное резервирование** предполагает использование избыточных элементов объекта и их связей. Назначение этих элементов – принимать на себя выполнение рабочих функций при отказах соответствующих основных элементов.

**Нагрузочное резервирование** – это резервирование с применением нагрузочных резервов. Нагрузочное резервирование, прежде всего, заключается в обеспечении оптимальных запасов способности элементов выдерживать действующие на них нагрузки. При других способах нагрузочного резервирования возможно введение дополнительных защитных или разгружающих элементов.

**Временное резервирование** – это способ повышения надежности, при котором системе в процессе функционирования предоставляется возможность израсходовать некоторое время, называемое резервным, для восстановления технических характеристик. Резерв времени можно израсходовать на переключение структурного резерва, обнаружение и устранение отказов, повторение работ, обесцененных отказами, ожидание загрузки в работоспособном состоянии.

**Информационное резервирование** предусматривает использование избыточной информации. Примерами такого резервирования могут служить повторение сообщений по каналам связи, применение контрольных программ в цифровых устройствах и т. п. Информационное резервирование обычно связано с введением избыточных элементов.

Перечисленные виды резервирования могут применяться как по отношению к отдельным элементам или их группам, так и по отношению к системе в целом. В первом случае резервирование **раздельное**, во втором – **общее**. Чаще всего используется структурное резервирование. В зависимости от способов включения резервных элементов в работу различают несколько его разновидностей.

**Постоянное резервирование** предусматривает параллельное подключение резервных элементов к основным при их одновременном совместном функционировании.

**Резервирование замещением** обеспечивает включение в работу резервных элементов только после отказа соответствующих основных.

**Скользящее резервирование** представляет собой резервирование замещением, при котором группа основных элементов резервируется

одним или несколькими резервными, заменяющими при необходимости любой элемент в группе.

Одним из основных показателей избыточности структурного резервирования является кратность резервирования.

**Кратность резервирования** представляет собой отношение числа резервных элементов к числу ими резервируемых (основных), выраженное несокращаемой дробью; различают резервирование с целой и дробной кратностью.

**Резервирование с целой кратностью** имеет место, когда один основной элемент резервируется одним и более резервными.

**Резервирование с дробной кратностью** имеет место, когда два и более однотипных основных элементов резервируются одним и более резервными (в случае нагруженного резерва – т. н. мажоритарные системы).

Резервирование с кратностью один к одному называется **дублированием**.

На рисунке 7.1 приведены примеры логических схем рассмотренных разновидностей структурного резервирования. При расчете надежности систем со структурным резервированием предварительно сводят структурные логические схемы с общим резервированием (рисунки 7.1 а, в) к схеме резервированного элемента путем замены групп последовательно соединенных элементов эквивалентными элементами, показатели безотказности которых рассчитывают в общем случае по формулам:

$$P_3(t) = \prod_{i=1}^k P_i(t); \lambda_3(t) = -\frac{1}{P_3(t)} \frac{dP_3}{dt},$$

где  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы каждого  $i$ -го элемента в группе из  $k$  последовательно соединенных элементов.

Показатели надежности системы (объекта) в целом при наличии отдельного резервирования рассчитывают с использованием соответствующих показателей резервируемых элементов (в том числе и эквивалентных) по формулам для основного соединения. Поэтому в дальнейшем рассматривается вывод расчетных формул лишь для показателей надежности резервированного элемента.

Эти формулы выводятся в основном в предположении экспоненциального распределения отказов. Если для конкретных объектов имеет место другой закон распределения, полученные расчетные выражения дают несколько заниженные значения показателей надежности.

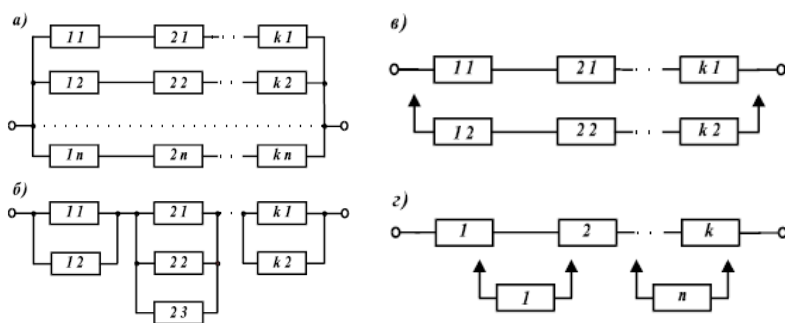


Рисунок 7.1 – Структурные логические схемы расчета надежности структурного резервирования: а – общее постоянное резервирование; б – раздельное постоянное резервирование; в – общее резервирование замещением; г – скользящее резервирование с дробной кратностью

### 7.3 Постоянное структурное резервирование без восстановления

Расчетная структурно-логическая схема для рассматриваемого варианта изображена на рисунке 7.2. Она соответствует параллельному включению  $n$  элементов, из которых один является основным и  $(n-1)$  – резервными. Такая группа может безотказно работать до тех пор, пока работоспособен хотя бы один элемент. Отказ группы (резервированного элемента) наступает при отказе всех элементов. Режим работы всех элементов одинаковый, и работают они одновременно.

Определим среднюю наработку до отказа резервированного элемента (группы в целом). Считаем, что все элементы равнонадежные и их отказы распределяются по экспоненциальному закону; при этом заданная интенсивность отказов каждого из них равна  $\lambda$ .

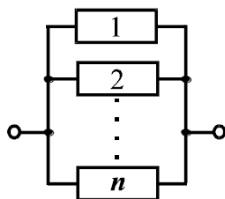


Рисунок 7.2 – Структурная логическая схема резервированного элемента с постоянным включением резерва

Случайный процесс функционирования резервированного элемента можно проиллюстрировать графически (рисунок 7.3). Первый отказ одного из элементов группы наступит через случайный промежуток времени  $t_1$ . В течение этого времени группа функционирует в полном составе, и параметр экспоненциального закона распределения составляет  $n\lambda$ . Второй отказ в группе наступит через случайное время  $t_2$ , в течение которого в работе находятся  $n - 1$  элементов. Основным параметр распределения при этом  $\lambda(n - 1)$ . Отказ последнего элемента наступит через время  $t_n$  после предыдущего отказа с параметром  $\lambda$ .

В общем случае случайные промежутки времени  $t_i$  между любыми смежными  $(i - 1)$ -м и  $i$ -м отказом распределены по экспоненциальному закону с параметром  $(n - i + 1)\lambda$  и имеют математическое ожидание

$$M_{ti} = \frac{1}{(n - i + 1)\lambda}.$$

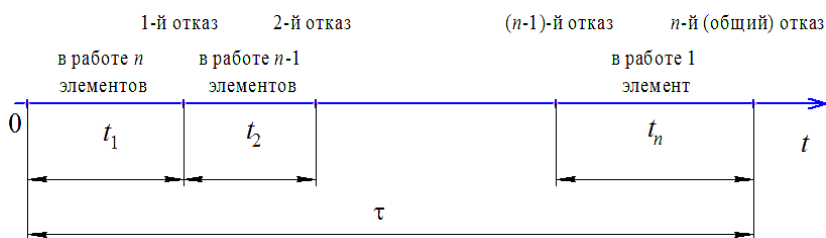


Рисунок 7.3 – Случайный процесс функционирования резервированного элемента с постоянным резервированием

Отказ группы в целом наступает после отказа последнего  $n$ -го элемента через случайное время  $\tau$  после начала работы.

$$\tau = \sum_{i=1}^n t_i.$$

Средняя наработка до отказа резервированного элемента  $T_{1p}$  определится как математическое ожидание случайной величины  $\tau$ .

$$T_{1p} = M_{\tau} = \sum_{i=1}^n M_{ti} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n - i + 1} = T_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{n - i + 1}, \quad (7.2)$$

где  $T_1$  – средняя наработка до отказа одного элемента.

Определим вероятность безотказной работы группы  $P_p(t)$  для общего случая, когда элементы могут быть неравнонадежными, и их отказы распределяются по любому произвольному закону. Для каждого элемента известна вероятность безотказной работы  $P_i(t)$ .

При работе группы возможны следующие события:  $B$  – группа в течение времени  $t$  работоспособна, т. е. работоспособен хотя бы один элемент;  $\bar{B}$  – группа в течение времени  $t$  отказала в целом, т. е. отказали все  $n$  элементов;  $A_i$  –  $i$ -й элемент в течение времени  $t$  работоспособен;  $\bar{A}_i$  –  $i$ -й элемент в течение времени  $t$  отказал.

Связь между этими событиями можно выразить как

$$B = \sum_{i=1}^n A_i; \quad \bar{B} = \prod_{i=1}^n \bar{A}_i.$$

Поскольку как события  $A_i$ , так и события  $\bar{A}_i$  являются совместными и независимыми, то для нахождения  $P_p(t) = P(B)$  проще определить вероятность противоположного события – отказа группы  $Q_p(t) = P(\bar{B})$ , а затем найти и  $P_p(t)$ .

В соответствии с теоремой умножения вероятностей, гласящей о том, что вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$Q_p(t) = P(\bar{B}) = \prod_{i=1}^n P(\bar{A}_i) = \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)].$$

Отсюда

$$P_p(t) = 1 - Q_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)], \quad (7.3)$$

что соответствует общему случаю расчета вероятности безотказной работы группы с параллельным соединением элементов.

Для равнонадежных элементов

$$P_p(t) = 1 - [1 - P_1(t)]^n, \quad (7.4)$$

где  $P_1(t)$  – вероятность безотказной работы одного элемента.

Для равнонадежных элементов при экспоненциальном распределении отказов

$$P_p(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n. \quad (7.5)$$

При  $n = 2$  – дублирование

$$P_p(t) = e^{-\lambda t}(2 - e^{-\lambda t}). \quad (7.6)$$

#### 7.4 Резервирование замещением

В структурную логическую схему для случая такого резервирования (рисунок 7.4) входит один основной элемент, находящийся в работе, и  $n-1$  элементов, находящихся в ненагруженном резерве. Резервные элементы включаются в работу по мере отказов основного мгновенно. Отказ  $n$ -го элемента приводит к общему отказу группы. Принимаем, что все элементы равнонадежны ( $\lambda_i = \lambda = \text{const}$ ), а переключающее устройство абсолютно безотказно. Рассмотрим случайный процесс функционирования группы (рисунок 7.5). Через случайный промежуток времени  $t_1$  после начала работы группы происходит отказ основного элемента (1-й отказ в группе). Вместо него без перерыва в работе подключается один из резервных, который также отказывает через случайный промежуток времени  $t_2$  (2-й отказ в группе). Подключается следующий резервный элемент и т. д. до отказа  $n$ -го (последнего) элемента (общий отказ группы).

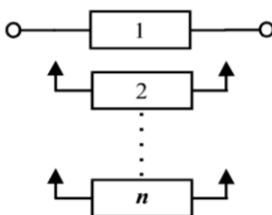


Рисунок 7.4 – Структурная логическая схема расчета надежности с резервированием замещением

Случайное время  $\tau$  работы группы до ее отказа

$$\tau = \sum_{i=1}^n t_i,$$

а среднее время ее безотказной работы

$$T_{1p} = M_{\tau} = \sum_{i=1}^n M_{t_i},$$

где  $M_{\tau}$  – математическое ожидание времени безотказной работы группы;  $M_{t_i}$  – математическое ожидание случайной величины – времени работы группы между отказами основного элемента.

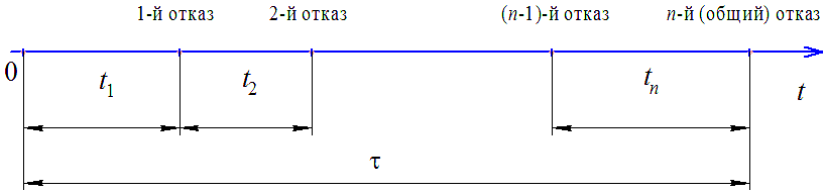


Рисунок 7.5 – Случайный процесс функционирования группы с резервированием замещением

С учетом  $M_{t_i} = 1/\lambda$

$$T_{1p} = \frac{n}{\lambda} = nT_1, \quad (7.7)$$

где  $T_1$  – средняя наработка на отказ одного элемента.

Определим вероятность безотказной работы группы  $P_p(t)$  в течение времени  $t$ . Группа будет работать безотказно, пока имеет место хотя бы одно из несовместных событий  $A_i$ :  $A_0$  – нет ни одного отказа в группе;  $A_1$  – отказ одного элемента,  $A_2$  – отказ второго элемента и т. д. до  $A_{n-1}$  – отказ  $(n-1)$ -го элемента. Событие  $B$ , соответствующее безотказной работе группы в течение времени  $t$ :

$$B = \sum_{i=0}^{n-1} A_i.$$

Отсюда по теореме сложения вероятностей

$$P_p(t) = P(B) = P\left(\sum_{i=0}^{n-1} A_i\right) = \sum_{i=0}^{n-1} P(A_i). \quad (7.8)$$



Вероятность того, что элемент за время  $t$  отказывает ровно  $i$  раз (при условии его мгновенной замены резервными) определяется по закону Пуассона.

$$P(A_i) = P_{(k=i)} = \frac{(\lambda t)^i}{i!} \exp(-\lambda t),$$

где  $k$  – случайное число отказов за время  $t$ .

Таким образом, вероятность безотказной работы при условии резервирования основного элемента замещением определится формулой

$$P_p(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}. \quad (7.9)$$

Для случая дублирования

$$P_p(t) = (1 + \lambda t) \exp(-\lambda t). \quad (7.10)$$

### 7.5 Скользящее резервирование

В расчетную структурно-логическую схему объекта для общего случая скользящего резервирования (рисунок 7.6) входят  $m$  основных однотипных элементов и  $n$  резервных ( $m > n$ ). Все элементы равнонадежные. Закон распределения отказов экспоненциальный.

При отказе любого из основных элементов на его место включается один из резервных. Отказ объекта происходит при  $(n + 1)$ -м отказе в основной цепи.

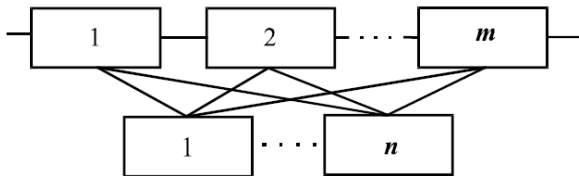


Рисунок 7.6 – Структурная логическая схема объекта со скользящим резервированием

Рассмотрим два возможных варианта: резервные элементы находятся в нагруженном режиме и в ненагруженном режиме.

*Нагруженный резерв.* Приведем расчетную формулу без вывода:

$$T_{1p} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^n \frac{1}{m+i} = T_1 \sum_{i=0}^n \frac{1}{m+i}, \quad (7.11)$$

где  $\lambda$  и  $T_1$  – соответственно интенсивность отказов и средняя наработка до отказа одного элемента.

Определим вероятность безотказной работы резервированной группы  $P_p(t)$  в течение времени  $t$ . Группа работает безотказно, пока имеет место хотя бы одно из событий  $A_i$ :  $A_0$  – все элементы в группе работоспособны;  $A_1$  – отказал один любой элемент;  $A_2$  – отказали два любых элемента и т. д.;  $A_n$  – отказали  $n$  любых элементов. Число различных вариантов этих событий равно

$$C_{m+n}^i = \frac{(m+n)!}{i!(m+n-i)!}. \quad (7.12)$$

Событие  $B$  – безотказная работа группы в течение времени  $t$

$$B = \sum_{i=0}^n C_{m+n}^i A_i.$$

Вероятность безотказной работы резервированной группы (вероятность события  $B$ ) можно определить на основании теоремы сложения вероятностей для несовместных событий

$$P_p(t) = P(B) = \sum_{i=0}^n [C_{m+n}^i P(A_i)], \quad (7.13)$$

где  $P(A_i)$  – вероятность события  $A_i$ , которая может быть рассчитана на основании теоремы умножения вероятностей для независимых событий.

$$P(A_i) = [1 - P(t)]^i [P(t)]^{n+m-i}, \quad (7.14)$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы одного элемента.

Рассмотрим частный случай скользящего резервирования с нагруженным резервом – *мажоритарное резервирование*, часто используемое в объектах дискретного действия. При мажоритарном резерви-

ровании вместо одного элемента (канала), требуемого для обеспечения правильного функционирования объекта, включаются параллельно несколько идентичных элементов (каналов), выходы которых подаются на специальное (мажоритарное) устройство. Его задачей является передача такого сигнала, который поступает с выходов большинства элементов резервированной группы. При этом из цепи исключаются ложные сигналы, поступающие с выходов отказавших элементов.

Наибольшее распространение получило мажоритарное резервирование по принципу «два из трех», когда резервированная группа состоит из трех элементов и во внешнюю цепь передается сигнал, совпадающий с одинаковыми сигналами не менее двух элементов. Условием безотказной работы группы при этом является безотказная работа любых двух элементов из трех (а также мажоритарного устройства) в течение заданного времени  $t$ . Подставив в формулы (7.12)–(7.14) значения  $m = 2$  и  $n = 1$ , а также учитывая вероятность безотказной работы мажоритарного устройства  $P_m(t)$ , получим расчетную формулу для вероятности безотказной работы группы с мажоритарным резервированием по принципу «два из трех»:

$$P_p(t) = P_m(t)[3P^2(t) - 2P^3(t)], \quad (7.15)$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы в течение времени  $t$  одного элемента (канала).

*Ненагруженный резерв.* В этом случае элементы, находящиеся в резерве, отказывать не могут. В работе постоянно  $m$  элементов с суммарной интенсивностью отказов  $m\lambda$ . Отказ группы наступает при отказе  $(n+1)$ -го элемента.

Анализируя поток отказов так же, как и в предыдущих случаях, получаем расчетную формулу для определения средней наработки до отказа резервированной группы в виде

$$T_{1p} = \frac{n+1}{m\lambda} = \frac{n+1}{m} T_1. \quad (7.16)$$

Вероятность безотказной работы группы в течение времени  $t$  по аналогии с выражением (7.9)

$$P_p(t) = \exp(-m\lambda t) \sum_{i=0}^n \frac{(m\lambda t)^i}{i!}. \quad (7.17)$$

## 7.6 Проблемы создания высоконадежных систем

**Основная проблема надежности технических систем.** Сложные технические системы должны длительное время работать безотказно. Это требование диктуется необходимостью обеспечения высокой их эффективности, безопасности, живучести, готовности и других показателей качества.

Сложные системы состоят из десятков и сотен тысяч элементов, а время их работы исчисляется тысячами часов.

К таким системам предъявляются высокие требования по надежности. Например, вероятность безотказной работы  $P(t) > 0,99$ , коэффициент готовности  $K_T > 0,98$ . Удовлетворяют ли таким требованиям современные технические системы?

Пусть система состоит из  $n = 1000$  элементов, длительность ее работы – 2000 ч, элементы системы высоконадежны, имеют постоянную интенсивность отказов, среднее значение которой  $\lambda = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .

Вероятность безотказной работы такой системы будет:

$$P_c(2000) = e^{-n\lambda t} = e^{-0,4} = 0,67.$$

Такая система эксплуатироваться не может по причине низкой надежности: вероятность ее отказа превосходит требуемую (0,01) в 33 раза. Для повышения ее надежности применим структурное резервирование. Расчеты показывают, что для обеспечения вероятности безотказной работы системы  $P_c(2000) = 0,99$  необходимо иметь 5 резервных систем в случае резервирования с постоянно включенным резервом и 2 резервные системы в случае резервирования замещением при условии, что автомат контроля и коммутации, обеспечивающий подключение резервной системы при отказе основной, идеальный в смысле надежности.

Существенно повысить работоспособность системы может восстановление резервированной системы при условии, что ремонт осуществляется без выключения системы. Расчеты показывают, что вероятность безотказной работы системы  $P_c(2000) = 0,99$  можно обеспечить при восстановлении дублированной системы со средним временем восстановления  $T_B < 100$  ч. При  $T_B = 100$  ч,  $P_c(2000) = 0,993$ .

Однако такой метод не всегда возможен. Нельзя ремонтировать двигатель или систему управления самолета в полете, спутника связи на орбите, океанский лайнер в плавании. Нельзя осуществлять ремонт техники в ее рабочем состоянии, если ремонт должен осуществляться в специальных мастерских. Следует также иметь в виду, что техниче-

ская реализация этого способа требует наличия системы диагностики отказов, что может привести к понижению надежности резервированной системы. Не следует также забывать, что резервирование существенно повышает стоимость системы, ее вес и габариты. В нашем случае при применении резервирования стоимость системы возрастет в 6 раз при общем резервировании и в 3 раза при резервировании замещением. На практике резервирование с восстановлением применяется редко.

Надежность элементов непрерывно увеличивается. Появление материалов высокой прочности, защищенных от коррозии и т. д., существенно уменьшает интенсивность отказов элементов. Однако сложность технических систем и требования к показателям их надежности растут с такой же скоростью, как и надежность элементов. Поэтому надежность многих сложных технических систем практически не растет. В этом основная проблема надежности техники.

**Технические проблемы обеспечения надежности сложных систем.** Основным способом повышения надежности является структурное резервирование. При этом наиболее эффективным считается раздельное резервирование. Такой вывод следует из теории. Он, безусловно, верен, но без учета практической реализуемости раздельного резервирования.

*Пример.* Пусть необходимо защитить систему управления от отказа дифференцирующей цепи, обеспечивающей устойчивость системы. Схема цепи приведена на рисунке 7.7.

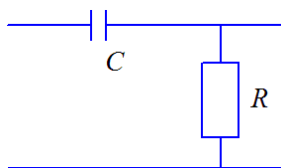


Рисунок 7.7 – Дифференцирующая цепь

Передаточная функция дифференцирующей цепи имеет вид

$$W(z) = \frac{T_z}{T_z + 1},$$

где  $T_z = RC$  – постоянная времени цепи.

Применим поэлементное резервирование для повышения надежности цепи. Резистор наиболее часто отказывает из-за обрыва. Тогда для повышения надежности необходимо включить параллельно еще один (резервный) резистор. Какой же величины должно быть сопротивление резервного резистора? Если его сопротивление равно  $R$  (резистор такой же, как и основной), то общее сопротивление цепи с двумя параллельно включенными резисторами будет  $R/2$ , т. е. постоянная времени дифференцирующей цепи уменьшится вдвое и не обеспечит устойчивости системы. Если же оба резистора будут иметь сопротивление  $2R$ , то цепочка будет иметь общее сопротивление  $R$ , но при отказе одного из резисторов (основного или резервного) сопротивление возрастет в 2 раза и вновь постоянная времени цепи выйдет за допустимые пределы. Наступит отказ системы управления. Таким образом, дублирование резистора не ведет к повышению надежности. В подобных случаях применяется резервирование с дробной кратностью.

Предположим, что устойчивость системы управления будет обеспечена, если сопротивление резистора изменится не более чем на  $1/3$ . При таком условии защитить систему от одного отказа можно, включив параллельно 3 резистора, каждый из которых имеет сопротивление  $3R$ . Кратность резервирования будет  $m = 1/2$ .

Конденсатор имеет два вида отказов – обрыв и короткое замыкание (пробой). Поэтому его резервирование можно осуществить только путем применения последовательно-параллельной схемы (рисунок 7.8).

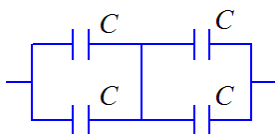


Рисунок 7.8 – Резервирование конденсатора

Таким образом, дифференцирующая цепь повышенной надежности будет иметь вид, показанный на рисунке 7.9.

Обратим внимание на то, что схема защищена только от одного отказа. При отказе любых двух элементов постоянная времени  $T$  может измениться на недопустимую величину, и устойчивость системы не будет обеспечена. Более того, эта схема не защищена от короткого замыкания конденсатора. Действительно, при коротком замыкании любого конденсатора емкость цепи увеличивается вдвое, т. е. вдвое увеличится постоянная времени  $T$ .

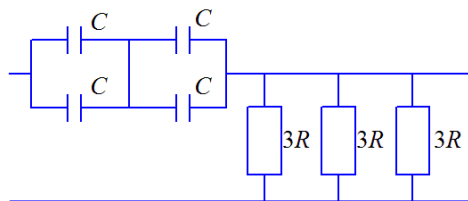


Рисунок 7.9 – Резервированная схема цепи обратной связи системы управления

Таким образом, мы создали схему, которая защищена лишь от одного отказа типа обрыв, увеличив число элементов в 3,5 раза. При этом надежность схемы от короткого замыкания уменьшилась.

Подобные эффекты имеют место при резервировании любого электротехнического элемента и даже схемы.

Применить здесь общее резервирование (всей дифференцирующей цепи) вряд ли возможно, т. к. для этого потребуется автомат контроля и коммутации, который будет более сложным, чем цепочка  $RC$ , а значит, менее надежным, чем дифференцирующая цепь.

Еще один *пример*. Для повышения надежности энергетической системы решено использовать дублирование генераторов. Пусть основной генератор имеет мощность  $W$ .

Если резервный генератор будет иметь такую же мощность, то постоянное резервирование приведет к большому избытку мощности. Поэтому генераторы (основной и резервный) берут меньшей мощности, но тогда при отказе одного из них другой будет работать с перегрузкой.

Экономически более целесообразно резервирование с дробной кратностью  $m = 1/2$ , т. е. использование трех генераторов, каждый из которых имеет мощность  $W/2$ . Тогда при отказе одного из них энергетическая система будет исправной, т. к. ее общая мощность станет равной  $W$ . При отказе двух генераторов наступит отказ системы, возникший из-за перегрузки системы. Однако такое резервирование приведет к снижению надежности энергетической системы *длительной* непрерывной работы, т. к. ее среднее время безотказной работы  $T = 5/6 T_0$ , где  $T_0$  – среднее время безотказной работы нерезервированного генератора. Такая схема позволяет повысить надежность энергетической системы *короткого* времени работы.

Система может иметь большой выигрыш в надежности при возможности ее ремонта без выключения из работы на период ремонта отказавшего генератора. Заметим, что в данном случае существенным

является наличие последствия отказов, которое мы не учли при расчете среднего времени безотказной работы.

Из приведенных примеров следует, что методы анализа надежности сложных систем должны учитывать:

- наличие последствия отказов сложных систем и систем с восстановлением;
- изменение основного параметра системы при отказе элементов в случае структурного резервирования;
- структуру сложной системы при ее физической реализуемости (наличие системы контроля, автоматов коммутации и т. д.);
- неодновременность работы элементов.

### ***Контрольные вопросы***

1. Приведите факторы, влияющие на надежность объектов.
2. Сравните эффективность методов повышения надежности объектов.
3. Приведите виды резервирования.
4. Охарактеризуйте общее и раздельное резервирование.
5. Охарактеризуйте постоянное и резервирование замещением.
6. Проанализируйте скользящее резервирование.
7. Охарактеризуйте кратность резервирования.
8. Проанализируйте мажоритарное резервирование.
9. Охарактеризуйте технические проблемы обеспечения надежности сложных систем.



## 8 ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

### 8.1 Значение и виды испытаний на надежность

На разных этапах изготовления технических устройств производятся их испытания, цель которых заключается в проверке соответствия фактических характеристик техническим требованиям. Частью таких испытаний являются испытания на надежность.

Получаемые результаты используются также для корректировки проектной и рабочей документации; для проектирования аналогичных и более сложных устройств, в состав которых входят испытываемые объекты; для выявления и анализа причин отказов и повреждений и разработки мероприятий по их устранению.

Сложные восстанавливаемые изделия единичного или мелкосерийного производства подвергаются испытаниям на надежность в индивидуальном порядке. В условиях крупносерийного и массового производства испытаниям подвергается некоторая выборка из генеральной совокупности (партии) одинаковых изделий, изготовленных в едином технологическом процессе. Режим испытаний должен соответствовать или быть максимально приближенным к реальным условиям эксплуатации, транспортирования или хранения (в зависимости от вида определяемых показателей надежности) испытываемых объектов.

В результате испытаний фиксируется т. н. первичная статистика – результаты наблюдений: продолжительность нахождения каждого объекта в работоспособном состоянии; моменты возникновения отказов, их характер и причины; продолжительность восстановления; моменты перехода в предельное состояние и пр.

Стандартами на испытания с целью сокращения их продолжительности допускается искусственное ускорение испытательного процесса за счет ужесточения одного или нескольких основных воздействующих факторов по сравнению с их расчетными значениями.

При имитации эксплуатационных условий испытания проводят, как правило, в циклическом режиме, когда в течение ряда циклов к объектам прикладываются одновременно или последовательно воздействия с фиксацией результатов наблюдений за их состоянием по завершении каждого цикла. Перевод продолжительности испытаний в циклах в физическое время производится с учетом коэффициента ускорения испытаний, рассчитываемого в соответствии со степенью ужесточения воздействующих факторов. При этом должны быть известны зависимости контролируемых показателей надежности от изменения этих факторов.

Характерной особенностью испытаний на надежность является то, что по результатам наблюдений показатели надежности получают в виде статистических оценок, а не их истинных значений. Это объясняется ограниченностью числа наблюдений (ограниченностью выборки испытуемых объектов). Рассчитываемые по результатам испытаний показатели носят название *выборочных*, или эмпирических. Их значения получают в виде точечных или интервальных оценок.

*Точечные оценки* представляют собой числовые характеристики положения случайных величин, каковыми и являются определяемые показатели надежности. Наиболее распространенными точечными оценками являются выборочное среднее и дисперсия.

*Интервальные оценки.* Точечные оценки показателей надежности не дают возможности судить о точности и достоверности получаемых результатов, т. е. о степени их отличия от истинных значений.

Если обозначить полученную точечную оценку показателя надежности  $\theta$ , а допускаемую при этом погрешность  $\pm\delta$ , то истинное значение исследуемого показателя  $\theta_0$  должно находиться в интервале

$$\theta - \delta \leq \theta_0 \leq \theta + \delta. \quad (8.1)$$

Поскольку величина  $\delta$  является случайной, точные границы этого интервала установить невозможно. Их определяют с некоторой заранее принятой вероятностью  $\gamma$  – доверительной вероятностью, которая представляет собой вероятность того, что интервал в установленных границах накроет истинное значение исследуемого показателя:

$$\gamma = P(\theta_n \leq \theta_0 \leq \theta_b), \quad (8.2)$$

где  $\theta_n, \theta_b$  – соответственно нижняя и верхняя границы, в пределах которых находится истинное значение исследуемого показателя.

Границы такого интервала, установленные с доверительной вероятностью  $\gamma$ , называются доверительными границами, а сам интервал – доверительным интервалом.

Доверительный интервал характеризует величину ошибки при оценке показателя надежности, доверительная вероятность – достоверность оценки. Наиболее часто величину доверительной вероятности выбирают из ряда чисел 0,8; 0,9; 0,95; 0,99; 0,995; 0,999.

Вероятность того, что доверительный интервал не накроет истинное значение исследуемого показателя, называется уровнем значимости:

$$\psi = P(\theta_n \geq \theta_0 \geq \theta_b) = 1 - \gamma. \quad (8.3)$$

Если требуется установить лишь одну из границ доверительного интервала – нижнюю или верхнюю (односторонний интервал), задаются соответственно доверительный вероятностью  $\gamma_1$  или  $\gamma_2$ :

$$\gamma_1 = P(\theta_0 \geq \theta_n); \quad (8.4)$$

$$\gamma_1 = P(\theta_0 \leq \theta_b). \quad (8.5)$$

Вероятности  $\gamma$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  связаны между собой соотношением

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - 1. \quad (8.6)$$

Классификация испытаний на надежность приведена в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Классификация испытаний на надежность

Признак классификации	Виды испытаний
Цель испытаний	Определительные, контрольные, исследовательские (граничные, климатические и др.)
Испытываемое свойство надежности	Испытания на безотказность, долговечность (ресурсные), ремонтпригодность, сохраняемость, комплексные испытания
Этапы разработки изделия	Доводочные, предварительные, приемочные
Уровень проведения	Ведомственные, межведомственные, государственные
Степень интенсификации процесса	Нормальные, ускоренные (сокращенные и форсированные)
Возможность последующего использования	Разрушающие, неразрушающие
Вид объекта испытаний	Испытания изделия (натурные), макета, модели
Место проведения	Лабораторные (стендовые), полигонные, эксплуатационные
Метод получения результатов	Экспериментально-статистические, расчетно-экспериментальные
Вид воздействия	Механические, электромагнитные, акустические, термические, гидравлические, пневматические, химические, климатические и др.

*Определительные* испытания проводятся для определения характеристик объекта с заданными значениями точности и (или) достоверности.

*Контрольные* испытания проводятся для контроля качества объекта. Различают приемо-сдаточные и типовые испытания. Контрольные испытания готовой продукции, проводимые при приемочном контроле, называются приемо-сдаточными. К типовым относятся испытания, проводимые с целью оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию, рецептуру или технологический процесс.

*Исследовательские* испытания проводятся для изучения определенных характеристик свойств объектов. Исследовательские испытания, проводимые для определения зависимости между предельно допустимыми значениями параметров объекта и значениями параметров режимов эксплуатации, называются граничными.

*Доводочные* испытания проводятся в процессе разработки изделий с целью оценки влияния вносимых в них изменений для достижения требуемых показателей качества.

*Предварительные* испытания – контрольные испытания опытных образцов (партий) изделий с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

*Приемочные* испытания – это контрольные испытания опытных образцов (партий) изделий, а также изделий единичного производства, проводимые соответственно для решения вопроса о целесообразности постановки на производство этих изделий или передачи их в эксплуатацию.

К *нормальным* относятся испытания, условия проведения которых обеспечивают получение необходимых характеристик в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации.

*Ускоренные* (сокращенные и форсированные) испытания – испытания, условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях. Сокращенные испытания проводятся по сокращенной программе без интенсификации процессов, вызывающих отказы и повреждения. Форсированные испытания основаны на интенсификации деградиционных процессов, приводящих к отказам.

*Разрушающие* испытания проводятся с применением разрушающих методов контроля, которые могут нарушить пригодность объекта к использованию по назначению. Неразрушающие испытания – испытания с применением неразрушающих методов контроля.

Испытаниям могут подвергаться как натурные опытные или серийные образцы изделий, так и их макеты и модели. *Натурные* испытания – испытания объекта в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению с непосредственным оцениванием или контролем определяемых характеристик свойств объекта. *Макет* для испытаний – изделие, представляющее собой упрощенное воспроизведение объекта испытаний или его части. *Модель* для испытаний – изделие, процесс, явление, математическая модель, находящиеся в определенном соответствии с объектом испытаний и (или) воздействиями на него и способные замещать его в процессе испытаний.

К *лабораторным* (стендовым) относятся испытания, проводимые в лабораторных условиях на испытательном стенде, т. е. на техническом устройстве, предназначенном для установки объекта испытаний в заданных положениях, создания воздействий, съема информации и осуществления управления процессом испытаний и (или) объектом испытаний.

*Полигонные* испытания проводятся на испытательном полигоне, т. е. на месте, предназначенном для проведения испытания в условиях, близких к условиям эксплуатации объекта, и обеспеченном необходимыми средствами испытаний.

К *эксплуатационным* относятся испытания, проводимые для определения (оценки) показателей надежности в заданных режимах и условиях эксплуатации.

## 8.2 Определительные испытания

Определительные испытания классифицируют по следующим признакам.

1. По характеру оценок показателей надежности:

– испытания с целью определения точечных оценок средних значений (среднее арифметическое) показателей надежности (средняя наработка до отказа, средний ресурс, среднее время восстановления и пр.);

– испытания с целью определения доверительного интервала возможных значений показателя надежности, который с заданной доверительной вероятностью накрывает математическое ожидание этого показателя.

2. По исходным данным:

– прямые испытания, основанные на использовании информации об отказах объекта;

– испытания, основанные на использовании косвенных признаков отказа (перегрев, уровни вибрации, шума и пр.).

3. По планам испытаний. План испытаний – правила, устанавливающие объем выборки, порядок проведения испытаний и критерии их прекращения. Планы имеют условные буквенные обозначения по типу:  $[NXY]$ , где  $N$  – объем выборки,  $X$  – признак восстанавливаемости объекта,  $Y$  – признак окончания испытаний.

*Признаки восстанавливаемости объекта испытаний:*

$U$  – объекты невосстанавливаемые и незаменимые в случае отказа;

$R$  – невосстанавливаемые, но заменяемые в случае отказа новыми идентичными отказавшим объектами;

$M$  – восстанавливаемые в случае отказа объекты.

*Признаки окончания испытания:*

$T$  – устанавливается время или наработка;

$T_{\Sigma}$  – устанавливается суммарная наработка всех объектов;

$N$  – до отказа всех испытываемых объектов;

$r$  – устанавливается число отказавших объектов;

$(r, T)$  – испытание прекращается при числе отказавших объектов  $r$  или по достижении наработки  $T$  каждого работоспособного объекта независимо от того, какое условие выполнено раньше;

$(r, T_{\Sigma})$  – испытание прекращается при числе отказавших объектов  $r$  или по достижении суммарной наработки всех испытываемых объектов  $T_{\Sigma}$ , независимо от того, какое условие выполнено раньше;

$(r_1, n_1), (r_2, n_2), \dots (r_{k-1}, n_{k-1}), r_k$  – после  $r_1$  отказов снимают  $n_1$  работоспособных объектов и т. д. до достижения  $r_k$  отказов;

$(T_1, n_1), (T_2, n_2), \dots (T_{k-1}, n_{k-1}), T_k$  – после достижения наработки  $T_1$  снимают  $n_1$  работоспособных объектов и т. д. до достижения наработки  $T_k$ ;

$z$  – каждый объект испытывают в течение наработки  $z_i = \min(t_i, \tau_i)$   $i = 1, 2, \dots N$ , где  $t_i$  – наработка до отказа  $i$ -го объекта;  $\tau_i$  – наработка до снятия с испытаний работоспособного  $i$ -го объекта;

$S$  – принятие решения при последовательных контрольных испытаниях.

Возможно 17 вариантов планов испытаний на надежность:  $[NUT]$ ,  $[NUR]$ ,  $[NUN]$ ,  $[NU(r, T)]$ ,  $[NRT]$ ,  $[NRr]$ ,  $[NR(r, T)]$ ,  $[NMT]$ ,  $[NMT_{\Sigma}]$ ,

$[NMr]$ ,  $[NM(r, T_{\Sigma})]$ ,  $[NU(r_1, n_1), (r_2, n_2), \dots, (r_{k-1}, n_{k-1}), r_k]$ ,  $[NU(T_1, n_1), (T_2, n_2), \dots, (T_{k-1}, n_{k-1}), T_k]$ ,  $[NUz]$ ,  $[NUS]$ ,  $[NRS]$ ,  $[NMS]$ .

Для определительных испытаний наиболее употребимыми являются планы  $[NUT]$ ,  $[NUR]$ ,  $[NUN]$ ,  $[NRT]$ ,  $[NRR]$ .

При планировании определительных испытаний определяют объем наблюдений и длительность испытаний. При этом задаются показатели достоверности результатов (доверительная вероятность) и их точность (предельная величина относительной погрешности оценки исследуемого показателя надежности).

Методы планирования разработаны для каждого из планов.

*План  $[NUN]$ .* Для определения объема наблюдений (объем выборки  $N$ ) считаются известными следующие исходные данные:

- относительная ошибка оценки соответствующего показателя надежности  $\delta$ ;
- односторонняя доверительная вероятность оценки  $\beta$ ;
- предполагаемый коэффициент вариации  $v = \sigma/\bar{X}$ ;
- закон распределения исследуемой случайной величины.

Относительная ошибка представляет собой меру точности оценки показателя надежности

$$\delta = \left| \frac{\Pi - \Pi^*}{\Pi} \right|,$$

где  $\Pi$  – оценка показателя надежности;  $\Pi^*$  – односторонняя доверительная граница показателя надежности (наиболее далеко отстоящая от  $\Pi$ ).

Относительную ошибку  $\delta$  выбирают из ряда: 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; вероятность  $\beta$  – из ряда: 0,8; 0,9; 0,95; 0,99.

Минимальный объем наблюдений  $N$  для *нормального* распределения с плотностью

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(t - M_x)^2}{2\sigma_t^2} \right]$$

определяется из выражения

$$\frac{t_{\beta, N-1}}{\sqrt{N}} = \frac{\delta}{v},$$

где  $t_{\beta, N-1}$  – квантиль распределения Стьюдента с  $N - 1$  степенями свободы, соответствующий вероятности  $\beta$ . Решения этого уравнения табулированы (таблица 8.2).

Следует отметить, что испытания по плану  $[NUN]$  требуют значительного времени (особенно при экспоненциальном законе распределения) и количества изделий.

*Пример.* Для плана  $[NUN]$  определить число объектов наблюдений, чтобы с односторонней доверительной вероятностью  $\beta = 0,90$  относительная ошибка  $\delta$  в определении среднего ресурса не превышала 0,10. Ресурс распределен нормально с коэффициентом вариации  $v = 0,20$ .

Таблица 8.2 – Объем наблюдений для нормального распределения

$\alpha$	$\beta$	$N$ для плана $[NUN]$ , нормальное распределение				
		$v = 0,10$	$v = 0,15$	$v = 0,20$	$v = 0,25$	$v = 0,30$
0,05	0,80	4	6	13	20	25
	0,90	8	15	25	40	65
	0,95	13	25	40	65	100
	0,99	25	50	100	150	200
0,10	0,80	–	3	5	8	10
	0,90	3	5	8	13	15
	0,95	5	8	13	20	25
	0,99	8	15	25	32	50
0,15	0,80	–	–	3	4	5
	0,90	–	3	4	6	8
	0,95	3	5	6	10	13
	0,99	5	8	13	15	
0,20	0,80	–	–	–	–	3
	0,90	–	–	4	5	6
	0,95	–	4	5	6	8
	0,99	4	6	8	10	15

*Решение.* По таблице 8.2 для  $v = 0,20$ ,  $\beta = 0,90$  и  $\delta = 0,10$  находим  $N = 8$ .

По результатам наблюдений получен  $v = 0,30$ .



Т. к.  $0,30 > 0,20$ , необходим дополнительный объем испытаний. Для  $\nu = 0,30$ ;  $\beta = 0,90$  и  $\delta = 0,10$  по таблице 8.2 находим  $N = 15$ .

Следовательно, под наблюдение необходимо дополнительно поставить 7 объектов.

### 8.3 Ускоренные испытания

**Сокращенные испытания** – ускоренные испытания без интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения. Уменьшение сроков получения показателей надежности достигается за счет прогнозирования поведения объекта испытаний на период, больший, чем продолжительность испытаний.

**Форсированные испытания** основаны на интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения; проводится преднамеренное увеличение скорости утраты работоспособности изделия.

Основной характеристикой ускоренных испытаний является коэффициент ускорения, показывающий, во сколько раз продолжительность ускоренных испытаний меньше продолжительности нормальных испытаний.

Коэффициент ускорения может исчисляться по наработке и по календарному времени. Коэффициент ускорения по наработке (календарному времени) – отношение наработки (календарного времени) изделия в нормальных испытаниях к наработке (календарному времени) в ускоренных испытаниях.

При планировании ускоренных испытаний для конкретного вида изделий необходимо в первую очередь установить принцип испытаний, затем на основании сформулированного принципа выбрать метод и режим испытаний. *Принцип* ускоренных испытаний – совокупность теоретических и экспериментально обоснованных закономерностей или допущений, на использовании которых основано проведение испытаний с сокращением их продолжительности. *Метод* ускоренных испытаний – совокупность правил применения принципов ускоренных испытаний для получения показателей надежности изделий. *Режим* ускоренных испытаний – режим, предусмотренный применяемым принципом и методом испытаний и обеспечивающий сокращение продолжительности испытаний.

Режим ускоренных испытаний может быть нормальным (для сокращенных испытаний), форсированным (для форсированных испытаний), комбинированным при чередовании нормального и форсированного режимов (для форсированных испытаний).

*Нормальный режим* – режим, при котором значения его параметров находятся в пределах, установленных в технической документации

для нормальной эксплуатации изделия. Частным случаем нормального режима является номинальный режим, соответствующий установленным параметрам внешних воздействий, принимаемых обычно за начало отсчета допустимых отклонений.

*Форсированный* режим – режим испытаний, обеспечивающий увеличение интенсивности процессов утраты работоспособности по сравнению с нормальным режимом. Форсированный режим может достигаться за счет изменения одного или одновременно нескольких форсирующих факторов.

В качестве форсирующего фактора используют усилие (момент), скорость (частоту), температуру, влажность среды, абразивность среды, химическую агрессивность среды и т. д.

Показатели надежности, полученные по результатам ускоренных испытаний, можно пересчитать для нормального режима при условии, что физические процессы разрушения при форсированных и ускоренных испытаниях одинаковы. Поэтому режимы ускоренных испытаний и форсирующий фактор могут изменяться при ускорении процесса испытаний только до определенного предела, называемого предельной нагрузкой (предельно допустимый уровень форсирующего фактора).

Результаты нормальных и ускоренных испытаний будут сопоставимы, если при соблюдении идентичности природы разрушения получаемые значения показателей надежности будут одинаковы, т. е.

$$R(t_n) = R(t_y),$$

где  $R(t_n), R(t_y)$  – показатели надежности при нормальном и ускоренном режимах соответственно.

К основным принципам ускоренных испытаний относятся:

- уплотнение рабочих циклов;
- экстраполяция по времени;
- усечение спектра нагрузок;
- учащение рабочих циклов;
- принцип сравнения;
- экстраполяция по нагрузке;
- принцип «доламывания»;
- принцип запросов.

**Уплотнение рабочих циклов** применяется при испытании изделий, которые в эксплуатации имеют большие перерывы в работе. На сокращении этих перерывов основано ускорение испытаний. Примером могут служить испытания машин с сезонной нагрузкой. В этом

случае, сокращая или совсем ликвидируя известные перерывы в эксплуатации, связанные с ночным временем, нерабочими климатическими периодами и т. п., можно добиться значительного ускорения по календарному времени.

*Экстраполяция по времени* основана на гипотезе о возможности достоверной оценки закономерностей процесса накопления повреждений по начальным этапам процесса. При этом испытания в нормальном режиме проводятся лишь на некотором начальном участке работы изделия, включающем выход в стационарный режим повреждения, измеряется параметр, определяющий накопленное повреждение, а затем эти результаты экстраполируются до перехода в неработоспособное (предельное) состояние.

Практически при всяком детерминированном изменении накопленного повреждения  $\eta$  (например, величина износа) во времени  $t$  путем соответствующего преобразования координат стационарный процесс его накопления можно отобразить в линеаризованном виде. Выравнивание методом наименьших квадратов в этом случае сводится к отысканию коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения линейной регрессии

$$\eta = at + b.$$

Значения этих коэффициентов определяются на основе результатов испытаний по значениям повреждения  $\eta_i$  (величина накопленного износа), соответствующим определенным моментам времени  $t_i$ .

*Усечение спектра нагрузок* заключается в отбрасывании определенной части нагрузок, не оказывающих заметного повреждающего воздействия на объект испытаний. Точное воспроизведение спектра нагрузок представляет значительные технические трудности, поэтому проводят статистический анализ повторяемости нагрузок различных уровней и составляют программный блок нагрузок, имитирующий спектр эксплуатационных нагрузок.

Частным случаем усечения спектра нагрузок является использование из всего рабочего цикла, состоящего из пуска, установившегося движения и останова, только двух элементов – пуска и останова. Целесообразность применения этого принципа основана на свойстве некоторых механизмов сохранять высокую износостойкость при установившемся движении, которое характеризуется гидродинамическим трением. Во время пуска или останова наблюдается граничное или даже сухое трение, приводящее к значительному износу рабочих поверхностей.

Исходя из предположения, что установившееся движение не приводит к существенному износу, в испытаниях воспроизводят режим пусков и остановов. Ресурс при этом пересчитывают по следующей формуле, пренебрегая временем пусков и остановов:

$$T_p = N\bar{t}_z,$$

где  $N$  – число пусков-остановов;  $\bar{t}_z$  – средняя продолжительность интервала между пусками, определяемая по данным эксплуатации или расчетным методом с учетом функционального назначения испытуемого объекта.

Испытания по этому принципу дают несколько завышенную оценку ресурса, но в большинстве случаев вполне приемлемую для практического использования.

Форсирование пусками-остановами применяется при ускоренных испытаниях коробок перемены передач, муфт сцепления, электродвигателей и других механизмов и агрегатов, работающих в циклических режимах эксплуатации.

**Принцип учащения рабочих циклов** основан на увеличении частоты циклического нагружения или скорости движения под нагрузкой испытуемого элемента изделия. Предполагается, что долговечность изделия, выраженная в количестве циклов до предельного состояния, не зависит от частоты приложения нагрузки. При этом коэффициент ускорения определяется заранее из выражения

$$K_y = \frac{f_y}{f_n},$$

где  $f_y, f_n$  – частота приложения нагрузки соответственно при ускоренных и нормальных испытаниях.

Принцип учащения рабочих циклов используется при стендовых испытаниях изделий. Коэффициент ускорения ограничивается скоростными возможностями испытательного оборудования, а иногда и возникновением сопутствующих процессов (например, повышением температуры), искажающих прямой переход к нормальным по частотам условиям.

Модификацией принципа учащения рабочих циклов является проведение испытаний подвижных сопряжений деталей машин на изнашивание при повышенных скоростях скольжения.

Выражая ресурс по износу в виде накопленного пути трения  $L$  и считая в первом приближении, что  $L_y = L_n$  (это условие может быть корректно применено к процессу изнашивания лишь в очень ограниченном диапазоне изменения скоростей скольжения), можно определить коэффициент ускорения:  $K_y = v_y/v_n$ .

Для практической реализации этого принципа необходимо сохранение параметров, определяющих физические условия трения, в тех же пределах, что и при нормальных испытаниях. Так, для поддержания заданного температурного режима необходимо в ускоренных испытаниях использовать охлаждение поверхностей трения. Кроме того, увеличение частоты вращения, например, для подшипников скольжения может замедлить процесс изнашивания благодаря переходу от граничного к гидродинамическому трению.

**Принцип сравнения** основан на проведении испытаний изделия в форсированном режиме и пересчете полученных результатов с помощью известных данных по эксплуатации аналогичных изделий.

В зависимости от имеющейся информации оценка надежности изделий производится тремя способами:

- 1) сравнением долговечности двух изделий по результатам только форсированных испытаний;
- 2) сравнением долговечности изделий, испытываемых в форсированном режиме, с результатами испытаний в этом режиме изделия-аналога и данными его эксплуатации;
- 3) пересчетом результатов испытаний изделий в форсированном режиме применительно к нормальному режиму по имеющейся зависимости ресурса от уровня нагрузки.

Первый способ применяется в сравнительных испытаниях двух изделий при выявлении более долговечного из них. При этом считается, что изделие, проработавшее дольше в форсированном режиме, имеет больший ресурс и в нормальных условиях. Это правомерно при условии, что зависимости ресурса от уровня форсирующего фактора для сравниваемых изделий не пересекутся в интервале от номинального до форсированного уровней форсирующего фактора.

Второй способ предполагает наличие информации о долговечности изделия-аналога в форсированном и нормальном режимах. Определяемый из этой информации коэффициент ускорения для аналога умножается на значение наработки до предельного состояния, полученной при испытании нового изделия в форсированном режиме. Такая оценка производится в предположении, что физические свойства, определяющие зависимость ресурса от уровня

форсирующего фактора, у нового изделия и изделия-аналога близки. Этот способ применяется для испытания новых изделий массового производства, по которым имеется обширная информация о надежности предыдущих модификаций.

Третий способ основан на пересчете результатов форсированных испытаний посредством имеющейся зависимости ресурса изделия от нагрузки.

**Принцип «доламывания»** применяется при ресурсных испытаниях на усталость, изнашивание и длительную прочность.

Несколько однотипных изделий с различными наработками при эксплуатационном режиме нагружения имеют различную степень повреждения. Принцип предполагает для оценки степени повреждения довести объект до предельного состояния («доломать» его) на форсированном режиме.

В результате «доламывания» объекта оценивается его остаточный ресурс на форсированном режиме. Путем сравнения полученного остаточного ресурса объекта с полным ресурсом на форсированном режиме нагружения оценивается степень повреждения (степень исчерпания ресурса) объекта за время его эксплуатационной наработки.

Если полный ресурс объектов на форсированном режиме нагружения не известен, необходимо несколько новых изделий испытать на этом режиме до предельного состояния и оценить средний ресурс. Это не займет много времени при правильном выборе коэффициента форсирования нагрузки.

**Принцип запросов** применяется при ускоренных испытаниях прошедших приработку изделий, отказ которых обуславливается постепенным накоплением износных повреждений, проявляющихся в монотонном изменении уровня контролируемого выходного параметра (износа лимитирующего элемента, производительности, расхода энергии и др.).

Ускоренные испытания по принципу запросов предназначены для ориентировочной оценки ресурса образца до достижения заданного предельного износа.

Испытания проводятся при последовательном чередовании нормального и форсированного режимов для каждого образца. В процессе испытаний устанавливается зависимость интенсивности изнашивания в нормальном режиме от уровня износа, накопленного изделием. Ускоренное получение всего необходимого ряда уровней накопленного износа обеспечивается испытаниями на ступенях с форсированным режимом.

Параметры нормального режима определяются нормативно-технической документацией.

Форсированный режим должен быть выбран таким, чтобы скорость изнашивания на каждой ступени с нормальным режимом при данном значении износа не зависела от того, при каком режиме был накоплен этот износ – форсированном или нормальном.

### ***Контрольные вопросы***

1. Приведите классификацию испытаний на надежность.
2. Охарактеризуйте определительные испытания.
3. Охарактеризуйте планы испытаний на надежность.
4. Охарактеризуйте виды ускоренных испытаний на надежность.
5. Охарактеризуйте режимы ускоренных испытаний.
6. Охарактеризуйте принципы ускоренных испытаний.
7. Охарактеризуйте принцип «уплотнение рабочих циклов».
8. Охарактеризуйте принцип «усечение спектра нагрузок».
9. Охарактеризуйте принцип «доламывания».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория надежности является достаточно трудным для студентов предметом. Она требует хороших знаний математики, компьютерных технологий решения математических задач, твердых знаний предметной области, в которой решаются задачи надежности.

Процессы, протекающие в технических системах и связанные с отказами техники, являются сложными случайными процессами. Их моделирование требует составления и решения алгебраических и дифференциальных уравнений высокого порядка. При этом в результате их решения получают показатели надежности, имеющие вероятностный смысл, который трудно понять, если нет опыта решения подобных задач.

Надежность сложных технических и информационных систем оценивается многими показателями. Определение каждого из них осуществляется по уникальной методике. Вычисление вероятности безотказной работы и функции готовности связано с решением дифференциальных уравнений. Вычисление среднего времени безотказной работы требует знания интегрального исчисления. Определение параметра потока отказов невозможно без знания методов решения интегральных уравнений и т. п. В результате в теории надежности имеется большое число методов анализа и синтеза технических систем по различным критериям надежности.

Однако, хорошо изучив теорию, можно не решить практическую задачу надежности. Для этого недостаточно только теоретических знаний, необходимо также иметь опыт решения задач.



## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
2. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2007. – 276 с.
3. Дорохов, А.Н. Обеспечение надежности сложных технических систем: учебник / А.Н. Дорохов, В.А. Керножицкий, А.Н. Миронов, О.Л. Шестопалова. – СПб.: Изд-во «Лань», 2010. – 352 с.
4. 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 с.
5. Решетов, Д.Н. Надёжность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев; под ред. Д.Н. Решетова. – М.: Высшая школа, 1988. – 240 с.
6. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем: учебник для студентов высших учебных заведений / В.А. Зорин. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 203 с.
7. Малафеев, С.И. Надежность технических систем. Примеры и задачи: учебное пособие / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 320 с.
8. Ефремов, И. Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / И. Ефремов, Н. Рахимова; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет». – Оренбург: ОГУ, 2013. – 163 с.
9. Надежность технических систем. Резервирование, восстановление: учеб. пособие / В.Д. Шашурин, В.М. Башков, Н.А. Ветрова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 60 с.

*Учебное издание*

**Третьяков Алексей Михайлович**

## **ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ**

Учебное пособие для студентов, обучающихся  
по направлению подготовки бакалавров  
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин  
и комплексов» (профиль подготовки «Автомобильный сервис»)

Редактор Малыгина И.В.  
Технический редактор Ускова И.А.

Подписано в печать 23.05.16. Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. 6,16. Тираж 36 экз. Заказ 2016-78  
Печать – ризография, множительно-копировальный  
аппарат «RISO EZ300».

Издательство Алтайского государственного  
технического университета им. И.И. Ползунова.  
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.

Оригинал-макет подготовлен ИИО БТИ АлтГТУ.  
Отпечатано в ИИО БТИ АлтГТУ.  
659305, г. Бийск,  
ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, 27.