

БАКАЛАВРИАТ И МАГИСТРАТУРА

**П.С. Королев
С.Н. Полесский
В.Э. Цветков
К.А. Беляев**

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рекомендовано
Экспертным советом УМО в системе ВО и СПО
в качестве **учебного пособия** для направлений
бакалавриата и магистратуры
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
и «Информатика и вычислительная техника»



КНОРУС • МОСКВА • 2023

УДК 004.41(075.8)
ББК 76.006.5я73
К68

Рецензенты:

В.А. Григорьев, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», генеральный директор ООО «Лаборатория инфокоммуникационных сетей», д-р техн. наук, проф.,

А.В. Строгонов, и.о. заведующего кафедрой полупроводниковой электроники и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

Авторы (Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»):

П.С. Королев, С.Н. Полесский, В.Э. Цветков, К.А. Беляев

Королев, Павел Сергеевич.

К68 Основы надежности вычислительных систем : учебное пособие / П.С. Королев, С.Н. Полесский, В.Э. Цветков [и др.]. — Москва : КНОРУС, 2023. — 182 с. — (Бакалавриат и магистратура).

ISBN 978-5-406-06404-7

Рассматриваются вопросы возникновения отказов вычислительных и способы борьбы с ними, основные показатели надежности и математические методы их оценки. Значительное внимание уделяется проведению расчетов надежности вычислительных систем на этапах проектирования.

Соответствует ФГОС ВО последнего поколения.

Для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлениям «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и «Информатика и вычислительная техника».

Ключевые слова: теория надежности; надежность электронных средств; вычислительные системы; испытания на надежность.

УДК 004.41(075.8)
ББК 32+32.973-018.2я73

Королев Павел Сергеевич
Полесский Сергей Николаевич
Цветков Вячеслав Эдуардович
Беляев Кирилл Алексеевич

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Изд. № 661234. Подписано в печать 29.08.2022. Формат 60×90/16.

Гарнитура «Newton». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 8,4. Тираж 500 экз.

ООО «Издательство «КноРус».

117218, г. Москва, ул. Кедрова, д. 14, корп. 2.

Тел.: +7 (495) 741-46-28.

Е-mail: welcome@knorus.ru www.knorus.ru

Отпечатано в АО «Т8 Издательские Технологии».

109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.

Тел.: +7 (495) 221-89-80.

© Королев П.С., Полесский С.Н.,
Цветков В.Э., Беляев К.А., 2023

© ООО «Издательство «КноРус», 2023

ISBN 978-5-406-06404-7

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Основные сокращения	7
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ	11
<i>Контрольные вопросы</i>	15
Глава 2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭС	16
2.1. Свойства надежности.....	16
2.2. Основные и комплексные показатели надежности.....	18
2.3. Физическая сущность и классификация отказов.....	23
<i>Задачи для самоконтроля</i>	25
<i>Контрольные вопросы</i>	26
Глава 3. ОСНОВЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭС	27
3.1. Основные математические модели надежности.....	27
3.2. Последовательное и параллельное соединение элементов.....	30
3.3. Коэффициент повышения надежности (эффективность резервирования).....	32
3.4. Общее резервирование системы.....	35
<i>Задачи для самоконтроля</i>	38
<i>Контрольные вопросы</i>	38
Глава 4. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭС НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	39
4.1. Основные задачи создания отказоустойчивых систем.....	39
4.2. Определение норм надежности.....	41
4.3. Ориентировочная оценка надежности.....	44
4.4. Особенности уточненной оценки надежности.....	47
4.5. Анализ структурных схем надежности ЭС.....	50
4.6. Оформление структурных схем надежности ЭС.....	55
<i>Задачи для самоконтроля</i>	58
<i>Контрольные вопросы</i>	59
Глава 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭС ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ, ИНСТРУМЕНТАМИ И ПРИНАДЛЕЖНОСТЯМИ	60
5.1. Назначение, состав и виды комплектов ЗИП.....	60
5.2. Методика расчета и оптимизации запасов в комплектах ЗИП ЭС.....	64
5.3. Порядок корректировки состава комплектов ЗИП.....	68
<i>Задачи для самоконтроля</i>	69
<i>Контрольные вопросы</i>	70

Глава 6. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ	71
<i>Контрольные вопросы</i>	117
Глава 7. ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ	118
7.1. Значение и виды испытаний на надежность.....	118
7.2. Задачи, возникающие при испытаниях на надежность.....	120
<i>Задачи для самоконтроля</i>	122
<i>Контрольные вопросы</i>	122
Глава 8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМ ТРЕБОВАНИЙ НАДЕЖНОСТИ	123
8.1. Метод рационального распределения норм надежности.....	123
8.2. Метод равномерного распределения.....	124
8.3. Метод пропорционального распределения.....	124
8.4. Метод распределения требований по надежности с учетом уязвимости элементов.....	125
8.5. Метод распределения требований по надежности с учетом важности подсистем.....	126
<i>Задачи для самоконтроля</i>	127
<i>Контрольные вопросы</i>	128
Приложение А	129
Приложение Б	132
Приложение В	153
Приложение Г	155
Приложение Д	157
Приложение Е	158
Приложение Ж	160
Библиографический список	175

ВВЕДЕНИЕ

Выпускаемые промышленностью изделия, в том числе и электронные средства (ЭС), предназначены для выполнения заданных функций в течение определенного времени. Способность изделий безотказно и эффективно функционировать характеризуются показателями надежности, отражающими определенные свойства изделия. В отличие от любых физических величин надежность не может быть непосредственно измерена, а может быть только количественно оценена или предсказана.

Необходимость расчёта надёжности технических устройств и систем существовала с момента использования их человеком. Например, в начале 1900-х годов существовала задача оценки среднего времени горения газовых фонарей, а в середине 1930-х, благодаря работам шведского ученого В. Вейбулла (Waloddi Weibull), получила известность задача описания среднего времени наработки электронной лампы до её выхода из строя (распределение Вейбулла).

Ярким примером поиска методов расчёта надежности является история создания ракетных комплексов Фау-1 и Фау-2 Вернером фон Брауном. В лаборатории Брауна работал немецкий математик Эрик Пьеружка (Eric Pieruschka), который доказал, что надёжность ракеты равна произведению надёжности всех компонент, а не надёжности самого ненадёжного элемента, как считал Браун. Позднее вместе в Брауном в середине 50-х годов в США работал талантливый немецкий инженер Роберт Луссер (Robert Lusser), который сформулировал основные теоретические положения будущей теории надёжности. Его формула для расчета надёжности системы с последовательным соединением элементов стала известна как «Закон Луссера» (Lusser's law).

К первым работам по расчёту надежности в Советском Союзе можно отнести статью инженера Якуба Б. М. «Показатели и методы расчета надёжности в энергетическом хозяйстве», опубликованную в журнале «Электричество», №18, 1934 г., и статью профессора Сифорова В. И. «О методах расчёта надёжности работы систем, содержащих большое число элементов» (Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. №6, 1954 г.) Независимо от закрытых работ немецких ученых, в указанных статьях надёжность систем с последовательным соединением рассчитывалась как произведение надёжности элементов. В 90-х годах развитие теории надежности в бывшем СССР приостановилось, вновь началось после 2000 года.

В настоящее время, в связи с повышением требований к продукции и ее усложнением надежность стала одной из главных проблем, а по-

следствия нарушений в работе различных приборов и устройств, которые нельзя оценить никакими экономическими показателями — является гибель людей в результате различных катастроф, отказов военной техники в ответственные моменты. Поэтому, повышение надежности, продление ее ресурса, сокращение затрат на ремонт и технического обслуживания — основные задачи заказчика, разработчика, производителя, пользователя.

Использование положений теории надежности на этапах проектно-конструкторских работ позволяет прогнозировать состояние и поведение изделия в реальных условиях эксплуатации. Поэтому основной целью пособия является рассмотрение методов и способов обеспечения требуемых показателей надежности изделий, закладываемых при их разработке.

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

$P(t)$	— вероятность безотказной работы за заданное время t
$q(t)$	— вероятность отказа за заданное время t
$\mu(t)$	— функция распределения времени до отказа
ω	— параметр потока отказов
$\lambda(t)$	— интенсивность отказов (в общем случае является функцией времени и используется в качестве основной справочной характеристики безотказности элементов)
T_0	— средняя наработка на отказ (кратко — наработка на отказ)
T_γ	— гамма-процентная наработка до отказа (обычно $\gamma \geq 90\%$)
T_{cp}	— средняя наработка до отказа (если она выражается временем, то данный показатель называется средним временем безотказной работы)
$t_{cp}^{(pec)}$	— средний ресурс, представляющий собой математическое ожидание ресурса изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(pec)}$	— гамма-процентный ресурс
t_{min}	— минимальная наработка (характеризует ресурсные возможности изделия)
T_B	— среднее время восстановления
$v(t_3)$	— вероятность восстановления в заданное время
t_γ	— гамма-процентное время восстановления
G_B	— средние затраты на восстановление (показывает, сколько в среднем потребуется денежных средств на восстановление работоспособности)
$t_{cp}^{(cp.cl)}$	— средний срок службы (представляет собой математическое ожидание срока службы изделий рассматриваемого типа)
$t_\gamma^{(cp.cl)}$	— гамма-процентный срок службы
$t_{min}^{(cp.cl)}$	— минимальный срок службы

$t_{cp}^{(coxpr)}$	— средний срок сохраняемости	PLM	— управление жизненным циклом изделий
$t_{\gamma}^{(coxpr)}$	— гамма-процентный срок сохраняемости	SLM	— управление обслуживанием
$t_{min}^{(coxpr)}$	— минимальный срок сохраняемости	ALM	— управление жизненным циклом приложений
$t_{cp}^{(xpr)}$	— средний срок хранения изделия (представляет собой математическое ожидание срока хранения изделий рассматриваемого типа)	SLM	— управление жизненным циклом услуг
$t_{\gamma}^{(xpr)}$	— гамма-процентный срок хранения (обычно $\gamma \geq 90\%$)	FRACAS-система	Failure Reporting Analysis and Corrective Action System (система оповещения об отказах, анализе и корректирующих действиях)
$t_{min}^{(xpr)}$	— минимальный срок хранения	FER	— коэффициент роста отказов
T_p	— средний ресурс	FL	— задержка отказа
T_{cl}	— средний срок службы	FA	— активизация отказа
T_c	— средний срок сохраняемости	AS	— средняя строгость
T_x	— средний срок хранения	DC	— рабочий цикл
k_e	— коэффициент готовности	АП	— аварийные последовательности
$k_{m.u.}$	— коэффициент технического использования	АСРН	— автоматизированная справочно-информационная система
$k_{e.o}$	— коэффициент оперативной готовности	АСУТП	— автоматизированная система управления технологическими процессами
γ	— коэффициента повышения надёжности	БД	— база данных
K_n	— коэффициент электрической нагрузки	ДО	— деревья отказов
RBD	— Reliability Block Diagram Methods	ДС	— деревья событий
FMEA	— Failure For Mode and Effects Analysis	ЗИП	— запасные части, инструменты и принадлежности
FRACAS	— модуль системы регистрации сбоев, анализа и корректирующих действий	ЗИП-Г	— групповой комплект ЗИП
RCM	— анализ технического обслуживания, ориентированного на надёжность	ЗИП-М	— монтажный комплект ЗИП
RBDs	— блок-схемы надёжности	ЗИП-О	— одиночный комплект ЗИП
FTA	— анализ дерева неисправностей	ЗИП-Пг	— подвижный групповой комплект ЗИП
DVP&Rs	— планы тестирования	ЗИП-Пр	— подвижный ремонтный комплект ЗИП
DRBFMs	— обзоры проектирования на основе режима отказа	ЗИП-Р	— ремонтный комплект ЗИП
PTC	— Parametric Technology Corporation	ЗЧ	— запасная часть
CAD\САПП	— двухмерное и трёхмерное проектирование	ИС	— информационная система
		КД	— конструкторская документация

КС	– конечные состояния
МЛТ резистор	– металлический лакированный теплостойкий резистор
ПК	– программный комплекс
РЭС	– радиоэлектронное средство
СВТ	– сложно-вычислительная техника
ССНТ	– система стандартов «Надежность в технике»
СЧ	– составная часть
ТЗ	– техническое задание
ТО	– техническое обслуживание
ЧТЗ	– техническое задание на часть системы
ЭКБ	– элементная компонентная база
ЭРИ	– электрорадиоизделие
ЭС	– элементы системы

Глава 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

В настоящее время теория надежности является одной из фундаментальных научных дисциплин, математический аппарат которой составляют теория вероятностей и математическая статистика. Для более глубокого понимания вопроса рассмотрим несколько существующих определений теории надежности.

Теория надежности изучает процессы возникновения отказов объектов в различные моменты времени и способы борьбы с этими отказами.

Известные ученые в области теории надежности Ю. К. Беляев и Б. В. Гнеденко в математической энциклопедии дали следующее определение. *Теория надежности* – инженерное направление применения математических методов, в котором разрабатываются:

- приемы расчета надежности технических систем,
- методы оценки надежности изготовленных изделий,
- способы оптимизации и повышения эффективности функционирования сложных технических систем и составляющих их элементов в процессе эксплуатации (включая в это понятие также хранение и перевозку).

В учебнике В. А. Острейковского дается иное определение. *Теория надежности* является прикладной технической наукой, которая изучает общие закономерности, которых следует придерживаться при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации объектов для получения максимальной эффективности и безопасности их использования.

С целью единого понимания сути теории надежности еще в годы существования СССР в нашей стране была разработана система стандартов «Надежность в технике» (ССНТ), которая обозначается как ГОСТ 27. В настоящее время ГОСТ 27. является межгосударственной, региональной системой стандартов стран СНГ.

Система стандартов «Надежность в технике» (Приложение А) предназначена обеспечить эффективность организационных, конструктивных, технологических и эксплуатационных мероприятий, направленных на достижение оптимального уровня надежности объектов,

а также объективность и сопоставимость результатов контроля и испытаний на надежность.

В систему стандартов «Надежность в технике» входят технические и организационно-методические стандарты, объекты стандартизации которых относятся к классификационным группам, указанным в таблице 1.1.

Таблица 1.1

**Классификационные группы системы стандартов
«Надежность в технике» ГОСТ 27.001-2009**

Код группы	Классификация группы объектов стандартизации
0	Общие вопросы надежности
1	Организация работ по обеспечению надежности
2	Способы обеспечения
3	Анализ и расчет надежности
4	Испытания, контроль и оценка надежности

Стандарты в системе «Надежность в технике» обозначаются:

ГОСТ 27. – Система стандартов «Надежность в технике»;

ГОСТ 27.Х – код группы по таблице 1.1;

ГОСТ 27.ХХХ – порядковый номер в данной кодовой группе;

ГОСТ 27.ХХХ-ХХ – год утверждения стандарта (через тире).

Например, ГОСТ 27.003–2016

Здесь ГОСТ 27. – ССНТ;

0 – код группы – общие вопросы надежности;

03 – порядковый номер стандарта в кодовой группе. Состав и общие правила задания требований по надежности;

2016 – год утверждения стандарта.

Основные термины определения надежности техники установлены ГОСТ 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения».

Согласно ГОСТ 27.102-2021 *надежность* – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Под *объектом* здесь понимается предмет рассмотрения, на который распространяется терминология в области надежности.

Надежность является одним из основных показателей качества, проявляющимся во времени и отражающим свойства объекта сохранять требуемые качественные показатели на протяжении всего времени его эксплуатации. Под качеством объекта понимается совокупность свойств, определяющих его пригодность для использования по назначению.

Например, источники вторичного питания характеризуется такими свойствами как: номинальная мощность нагрузки, постоянное стабилизированное выходное напряжение, амплитуда пульсаций выходного напряжения и др. Но эти показатели оценивают объект не полностью. Необходимо еще знать способность объекта сохранять эти свойства, эти показатели качества в течение определенного времени. Эта способность объекта оценивается надежностью.

В основе понятий теории надежности лежит представление о различных состояниях объектов в различные моменты времени.

Исправное состояние (исправность) – состояние объекта, в котором все параметры объекта соответствуют всем требованиям, установленным в документации на этот объект.

Примечание: см. примечание 2 к определению неработоспособное состояние.

Неисправное состояние (неисправность) – состояние объекта, в котором хотя бы один параметр объекта не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на этот объект.

Примечание: см. примечание к определению неработоспособное состояние.

Работоспособное состояние – состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации.

Примечания:

1. Отсутствие необходимых внешних ресурсов может препятствовать работе объекта, но это не влияет на его пребывание в работоспособном состоянии.

2. См. примечание 2 к определению неработоспособное состояние.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект.

Примечания:

1. Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний вы-

деляют частично неработоспособные состояния, в которых объект способен частично выполнять требуемые функции.

2. Исправный объект всегда работоспособен, неисправный объект может быть как работоспособным, так и неработоспособным. Работоспособный объект может быть исправен и неисправен, неработоспособный объект всегда неисправен.

Состояние готовности (объекта) – состояние неработающего работоспособного объекта, в котором объект может выполнять требуемые функции в заданных условиях применения при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Примечания:

1. Работоспособный объект не всегда находится в состоянии готовности (при отсутствии необходимых ресурсов).

2. Объект, находящийся в резерве, может в некоторых случаях подвергаться воздействию рабочих параметров резервируемого объекта.

Рабочее состояние – состояние объекта, в котором он выполняет хотя бы одну требуемую функцию.

Примечание: работающий объект может находиться в работоспособном или в частично неработоспособном состоянии.

Нерабочее состояние – состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций.

Примечание: неработающий объект может находиться в любом из исправном, неисправном, работоспособном и неработоспособном состояний.

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

Переход объекта (изделия) из одного вышестоящего технического состояния в нижестоящее обычно происходит вследствие таких событий как отказы или повреждения.

Примечание: недопустимость дальнейшей эксплуатации устанавливаются на основе критериев предельного состояния объекта.

Критерий предельного состояния – признак или совокупность признаков, установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении предельного состояния объекта.

Примечания:

1. В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния.

2. Предельное состояние может возникнуть как в результате внутренних процессов/причин, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования.

Повреждение – нарушение исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Сбой – самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте теорию надежности: что она изучает, какие объекты в ней рассматриваются и разрабатываются.

2. Вспомните, как нумеруются стандарты в системе «Надежность в технике». Как расшифровывается ГОСТ 27.102-2021?

3. Что такое надежность объекта? Что в данном случае подразумевается под объектом?

4. Чем исправное состояние отличается от неисправного, работоспособное – от неработоспособного, а рабочее – от нерабочего?

5. В чем принципиальное различие между повреждением, отказом и сбоем?

Глава 2 ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭС

2.1. СВОЙСТВА НАДЕЖНОСТИ

Надежность — это сложное понятие, включающее в себя характеристики совокупности свойств, определяющих пригодность объекта к нормальной эксплуатации. К их числу относятся такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость (рис. 2.1).

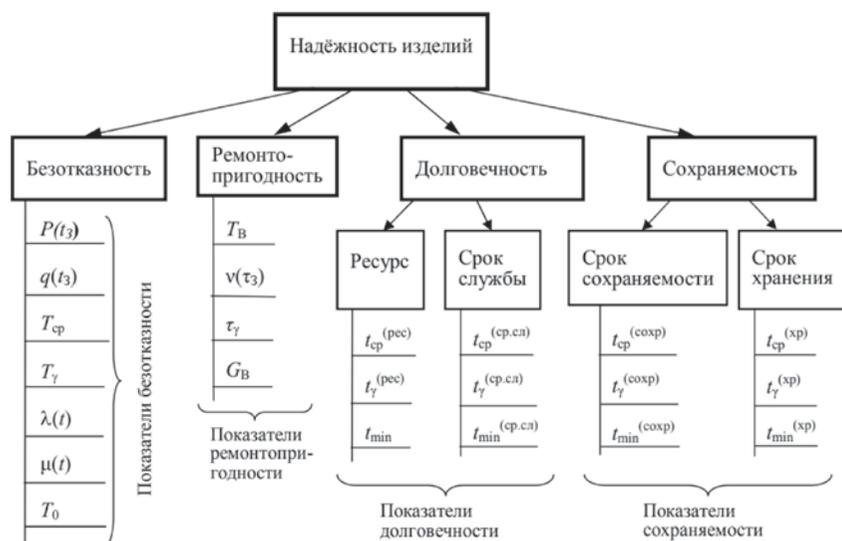


Рис. 2.1. Свойства, основные составляющие и показатели надежности объекта

Для количественной оценки надежности объекта применяются количественные показатели оценки отдельных его свойств:

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения. Показатели безотказности: вероятность безотказной работы, вероятность отказа,

плотность распределения наработки до отказа, функция распределения времени до отказа, средняя наработка до отказа, наработка на отказ, интенсивность отказов и параметр потока отказов.

Долговечность — свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния. Показатели долговечности: средний ресурс, гамма-процентный ресурс и назначенный ресурс.

Ремонтопригодность — свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению состояния, в котором объект способен выполнять требуемые функции, путем технического обслуживания и ремонта. Показатели ремонтпригодности: вероятность восстановления в заданное время и среднее время восстановления.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования. Показатели сохраняемости: средний срок сохраняемости и гамма-процентный срок сохраняемости.

Каждое из указанных выше свойств объекта (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость), которые в целом характеризуют его надежность, определяются соответствующими показателями надежности по определенным планам наблюдения.

Для объектов разного назначения и устройства применяются различные показатели надежности (Приложение Ж). Можно выделить пять групп объектов, различающиеся показателями и методами оценки надежности:

- неремонтируемые объекты, применяемые до первого отказа;
- ремонтируемые объекты, восстановление которых возможно;
- ремонтируемые объекты, восстановление которых в процессе применения невозможно (невосстанавливаемые объекты);
- ремонтируемые восстанавливаемые в процессе применения объекты, для которых недопустимы перерывы в работе;
- ремонтируемые восстанавливаемые в процессе применения объекта, для которых допустимы кратковременные перерывы в работе.

Классификация объектов по показателям и методам оценки надежности приведена на рисунке 2.2.

Безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость являются основными свойствами надежности объекта.



Рис. 2.2. Группы объектов, различающиеся показателями надежности

2.2. ОСНОВНЫЕ И КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

К показателям безотказности объекта относятся: вероятность безотказной работы, вероятность отказа, средняя наработка до отказа, наработка на отказ, интенсивность отказов и параметр потока отказов.

Вероятность безотказной работы (коэффициент надежности) — $P(t)$ — вероятность того, что в заданном интервале времени t (или в пределах заданной наработки) отказа объекта не возникает.

$$P(t) = \frac{N_t}{N_0} \quad (2.1)$$

где N_t, N_0 — число работоспособных объектов в момент времени (t) и в начальный момент времени, то есть при $t = 0$.

В условиях эксплуатации количественную оценку безотказной работы получают по результатам обработки опытных данных, путем расчета отношения числа объектов (N), безотказно проработавших до момента времени (t), к числу (N_0) объектов, работоспособных в начальный момент времени

$$P(t) = \frac{N_0 - r(t)}{N_0} \quad (2.2)$$

где $r(t)$ — число отказов за время t .

При экспоненциальном законе распределения наработки на отказ, характерном для установившегося режима эксплуатации, вероятность безотказной работы определяется по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2.3)$$

где λ — интенсивность отказов; e — основание натуральных логарифмов ($e = 2,7183$); t — время.

Значение $P(t)$, как всякой вероятности, может находиться в пределах $0 \leq P(t) \leq 1$.

Противоположное понятие — **вероятность отказа** $Q(t)$. А сумма вероятностей противоположных событий равна единице.

$$P(t) + Q(t) = 1, \quad (2.4)$$

Следует иметь в виду, что применение вероятности безотказной работы и вероятности отказа без указания периода времени наблюдения не имеет смысла, ибо для различной продолжительности работы объекта вероятность безотказной работы и вероятность отказа будут так же различными.

Средняя наработка до отказа (для невосстанавливаемых объектов) — T_{cp} — математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

При плане наблюдений $/N, U, T/$ средняя наработка до отказа определяется по формуле:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i + T(N-r)}{r} \quad (2.5)$$

где t_i — наработка i -го объекта до отказа; T — время наблюдения; N — число наблюдаемых объектов; r — число отказов во время наблюдения.

При плане наблюдения $/N, U, N/$ средняя наработка до отказа определяется по формуле:

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{t_n}{N} \quad (2.6)$$

где t_n — суммарная наработка до первого отказа всех наблюдаемых объектов; N — число наблюдаемых объектов.

Интенсивность отказов — $\lambda(t)$ (для невосстанавливаемого объекта) это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник (Приложение Б и Приложение В). При плане наблюдения $/N, U, T/$ определяется по формуле