

В. Ю. Шишмарёв

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УЧЕБНИК ДЛЯ БАКАЛАВРИАТА И МАГИСТРАТУРЫ

2-е издание, исправленное и дополненное

Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2017

УДК 62(075.8)

ББК 30.14я73

Ш65

Автор:

Шишмарёв Владимир Юрьевич — доктор технических наук, профессор, действительный член (академик) Академии безопасности, обороны и правопорядка, действительный член (академик) Московской академии естествознания, «Гранд-доктор философии» Европейской академии информатизации, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, до 2017 года — профессор кафедры технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов Института аэрокосмических конструкций, технологий и систем управления Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Рецензенты:

Галкин В. И. — кандидат технических наук, главный специалист Московского института электромеханики и автоматики;

Схиртладзе А. Г. — доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой стандартизации и сертификационных испытаний техники Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.

Шишмарёв, В. Ю.

Ш65

Надежность технических систем : учебник для бакалавриата и магистратуры / В. Ю. Шишмарёв. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 306 с. — (Серия : Бакалавр и магистр. Академический курс).

ISBN 978-5-534-05166-7

Учебник посвящен вопросам повышения надежности технических устройств и систем. В нем рассмотрены основные понятия теории надежности, показатели надежности ремонтируемых и неремонтируемых объектов, представлены испытания на надежность, а также методы расчета надежности систем различных типов.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям.

УДК 62(075.8)

ББК 30.14я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Шишмарёв В. Ю., 2010

© Шишмарёв В. Ю., 2017, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2017

ISBN 978-5-534-05166-7

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1. Основные понятия теории надежности	10
1.1. Основные термины и определения	10
1.2. Показатели надежности	14
1.3. Случайные величины и их характеристики	15
1.4. Оценка параметров надежности	18
1.5. Различные периоды работы технических устройств	21
1.6. Надежность в период нормальной эксплуатации	27
1.7. Надежность в период постепенных отказов, возникающих из-за износа и старения	29
1.8. Совместное действие внезапных и постепенных отказов	41
1.9. Особенности надежности восстанавливаемых изделий	42
<i>Контрольные вопросы</i>	44
Глава 2. Надежность неремонтируемых объектов	45
2.1. Показатели надежности неремонтируемых объектов	45
2.2. Теоретические распределения наработки до отказа	52
<i>Контрольные вопросы</i>	64
Глава 3. Надежность ремонтируемых объектов	65
3.1. Показатели надежности ремонтируемых объектов, не восстанавливаемых в процессе применения	65
3.2. Показатели надежности ремонтируемых объектов, восстанавливаемых в процессе применения	71
3.3. Ремонтпригодность и готовность технических устройств	82
3.4. Методы испытания на надежность и статистической обработки опытных данных	90
<i>Контрольные вопросы</i>	93
Глава 4. Надежность систем различных структур	94
4.1. Общие сведения	94
4.2. Надежность систем из последовательно и параллельно соединенных элементов	96
4.3. Надежность последовательных систем при нормальном распределении нагрузки по однотипным подсистемам	99
4.4. Оценка надежности систем, построенных в виде цепи	104
4.5. Надежность систем с резервированием	108
<i>Контрольные вопросы</i>	115

Глава 5. Формирование показателей надежности на стадиях проектирования	116
5.1. Выбор и обоснование показателей надежности	116
5.2. Назначение норм надежности	121
5.3. Распределение норм надежности системы по элементам	131
<i>Контрольные вопросы</i>	138
Глава 6. Методы расчета надежности систем различных типов	140
6.1. Расчет надежности систем по последовательно-параллельным логическим схемам	140
6.2. Выбор значений показателей надежности элементов	142
6.3. Коэффициентный способ расчета	146
6.4. Расчет систем с неодновременно работающими элементами	147
6.5. Учет цикличности работы аппаратуры	150
6.6. Применение формулы полной вероятности при расчете надежности систем	151
6.7. Переход от логической схемы для расчета надежности к графу состояний системы	153
6.8. Логико-вероятностный метод расчета надежности систем	156
<i>Контрольные вопросы</i>	158
Глава 7. Надежность автоматизированных систем управления	159
7.1. Особенности оценки надежности автоматизированных систем управления	159
7.2. Оценка надежности программ цифровых ЭВМ	161
7.3. Оценка безотказности программ по наработке	164
7.4. Оценка готовности программ	168
7.5. Надежностные характеристики оператора	171
<i>Контрольные вопросы</i>	175
Глава 8. Испытания на надежность	176
8.1. Специфика оценки надежности по результатам испытаний	176
8.2. Определительные испытания	177
8.3. Форсирование режима испытаний и сокращение числа образцов	182
8.4. Расчетно-экспериментальная оценка надежности по критериям работоспособности	187
8.5. Контрольные испытания	194
8.6. Планирование испытаний на надежность	197
<i>Контрольные вопросы</i>	202
Глава 9. Принципы конструирования, обеспечивающие получение надежных систем.....	203
9.1. Общие принципы обеспечения надежности	203
9.2. Роль этапа конструирования в обеспечении надежности	204
9.3. Задачи службы надежности на этапе конструирования	206

9.4. Влияние требований надежности на конструирование	208
9.5. Практические методы конструирования надежных систем.....	209
9.6. Методы конструирования, обеспечивающие получение высокой надежности	211
9.7. Анализ надежности конструкции	215
9.8. Функции службы надежности при разработке изделий	218
<i>Контрольные вопросы</i>	221
Глава 10. Надежность технологического оборудования.....	222
10.1. Повышение производительности и надежности технологического оборудования методами технической диагностики	222
10.2. Требования к качеству и показатели надежности АЛ и ГПС ...	223
10.3. Надежность станков	231
10.4. Надежность промышленных роботов	236
<i>Контрольные вопросы</i>	238
Глава 11. Надежность электрических машин	240
11.1. Общие положения	240
11.2. Надежность коллекторно-щеточного узла	244
11.3. Надежность контактных колец	251
11.4. Надежность подшипниковых узлов электрических машин	252
<i>Контрольные вопросы</i>	254
Глава 12. Надежность электронных блоков	255
12.1. Концепция бездефектного технологического процесса сборки блоков на печатных платах	255
12.2. Типовой технологический процесс контроля при сборке электронных блоков на печатных платах.....	257
12.3. Повышение надежности электронных блоков путем введения процесса электротермотренировки	259
12.4. Расчет надежности электронных блоков	261
<i>Контрольные вопросы</i>	265
Глава 13. Надежность соединений	266
13.1. Надежность соединений с натягом	266
13.2. Надежность сварных соединений	270
13.3. Надежность резьбовых соединений	273
<i>Контрольные вопросы</i>	280
Глава 14. Надежность типовых узлов механических систем... 281	281
14.1. Надежность зубчатых передач	281
14.1.1. Расчет на сопротивление контактной усталости.....	281
14.1.2. Расчет на сопротивление усталости при изгибе	289
14.2. Надежность подшипников качения	294
14.3. Надежность подшипников скольжения	299
<i>Контрольные вопросы</i>	304
Рекомендуемая литература.....	305

Введение

В связи с развитием технического прогресса все более актуальными становятся вопросы повышения надежности разнообразных технических устройств и систем — механизмов, машин, станков, аппаратов, приборов, систем автоматики, электронного оборудования и т.д. Надежность является важнейшим технико-экономическим показателем качества любого технического устройства или системы. В связи с этим при широком применении машин и исполнительных механизмов в системах автоматического управления производственными процессами технический уровень производства в большей степени определяется надежностью этих машин и систем. Отказы машин и систем в процессе эксплуатации наносят значительный материальный ущерб народному хозяйству.

Современные машины используются в разнообразных климатических условиях. К этим условиям относятся: изменение температуры и давления окружающего воздуха, высокая влажность, различные агрессивные среды, удары и вибрации, высокие механические перегрузки и т.д. Все эти факторы оказывают неблагоприятное влияние на надежность машин и систем. К машинам, работающим в указанных условиях, можно отнести, например, системы летательных аппаратов, используемых в условиях широкого диапазона изменения температуры и давления окружающего воздуха.

Под надежностью машины или системы понимается ее способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени и при определенных условиях применения. Следовательно, надежность машинной системы характеризуется вероятностью безотказной работы в течение заданного промежутка времени.

Под отказом в теории надежности понимается событие, после возникновения которого изделие утрачивает свою способность выполнять заданные функции. В общем случае под отказом следует понимать не только непредвиденную остановку системы из-за случайной ее неисправности, но также и вынужденное прекращение ее работы для выполнения необходимого ремонта и наладки. Поэтому к отказу в работе нужно относить и все выходы из рабочего состояния.

Первоначально вопросы надежности исследовались в области механического оборудования. Для обеспечения надежности работы этого оборудования при его проектировании и изготовлении закладывался определенный запас прочности в отдельные детали и этим создавалась необходимая гарантия надежности работы и долговечности службы.

С развитием электрификации возникли проблемы обеспечения надежной передачи электроэнергии. Такие меры, как использование параллельной работы электрических машин и трансформаторов, наличие на электростанциях резерва, объединение высоковольтных линий электропередач в единую систему и другие мероприятия направлены на то, чтобы снабжение электроэнергией потребителей было более надежным.

Новое направление проблема надежности получила с появлением и развитием радиоэлектроники, авиации, ракетной и космической техники. Вначале проблема надежности в этих отраслях решалась путем использования высоких запасов прочности и широкого применения резервирования, что приводило к значительному увеличению массы оборудования. Однако такой путь повышения надежности для новых типов авиационного оборудования и радиоэлектронной аппаратуры оказался неприемлемым. Современная техника требует существенного уменьшения массы и габаритных размеров оборудования при высокой его надежности.

Надежность сложного оборудования зависит от надежности работы его элементов. Например, надежность электрической машины, как сложного устройства, зависит от надежности работы ее основных частей — магнитной системы, обмоток статора и ротора, подшипников, коллектора или контактных колец и щеточного устройства. Теория надежности различает три характерных типа отказов, которые внутренне присущи машине или любому изделию и проявляются независимо от обслуживающего персонала:

1) отказы, которые происходят в течение раннего периода эксплуатации. Они называются приработочными отказами и в большинстве случаев происходят вследствие недостатков технологии производства и недостаточного качества контроля деталей при их изготовлении и сборке;

2) отказы, вызываемые износом отдельных частей машины и систем. Они возникают в машинах и системах, которые длительно работают без ремонта или же неправильно обслуживаются. Отказы за счет износа деталей являются признаком старения системы. Во многих случаях отказы в работе системы за счет

износа ее деталей могут быть ограничены путем своевременной замены их новыми во время ремонта;

3) внезапные отказы в период нормальной эксплуатации системы, которые возникают случайно и не могут быть устранены ни наладкой, ни наилучшим ее обслуживанием. Под внезапным отказом понимается отказ, возникший в результате скачкообразного изменения характеристик или параметров машины или системы под влиянием внезапных перегрузок или других факторов.

Теория надежности машин и систем развивается относительно недавно и поэтому не может еще претендовать на законченность. Некоторые вопросы этой теории еще недостаточно разработаны и нуждаются в уточнении. Имеющиеся опубликованные неполные статистические данные об уровне надежности различных типов эксплуатируемых машин и систем в настоящее время в связи с интенсивным развитием новых методов проектирования и производства уже недостаточно полно отражают фактическое состояние проблемы надежности, в особенности на фоне совершенствования конструкций, появления новых материалов для них и т.д. Теория надежности машин и систем охватывает широкий круг вопросов, отражающих общую теорию надежности, вопросы проектирования, технологии производства и эксплуатации этих систем. В связи с этим ознакомление с этой проблемой требует знаний в области конкретных изделий и математической подготовки.

В результате изучения курса студент должен:

знать

- основные понятия, термины и определения, используемые в теории надежности;
- показатели надежности ремонтируемых и неремонтируемых объектов;
- методы расчета надежности систем различных типов и структур;
- принципы конструирования обеспечивающие получение надежных систем;

уметь

- использовать основные математические модели надежности для формализации задач обеспечения и управления надежностью изделий и технических систем;
- использовать справочный материал для определения типа математической модели надежности изделий и методов ее исследования;
- формировать показатели надежности на стадиях проектирования;

- выбирать методы расчета или экспериментального определения надежности технических систем применительно к сфере своей профессиональной деятельности;

- планировать испытания на надежность;

владеть

- математическим аппаратом теории надежности в научных исследованиях и при решении практических задач управления надежностью изделий и технических систем;

- терминологическим аппаратом в области надежности технических систем;

- навыками обеспечения надежности электрических машин, электронных блоков, узлов механических систем и технологического оборудования;

- методами проведения испытаний на надежность.

1.1. Основные термины и определения

Надежность (общая) — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации.

Первостепенное значение надежности в технике связано с тем, что уровень надежности в значительной степени определяет развитие техники по основным направлениям: автоматизации производства, интенсификации рабочих процессов и транспорта, экономии материалов и энергии.

Современные технические средства состоят из множества взаимодействующих механизмов, аппаратов и приборов. Например, в современных автоматизированных прокатных комплексах насчитывается более миллиона деталей, современные системы радиоуправления ракетами имеют десятки миллионов элементов, тогда как первые простейшие машины и радиоприемники состояли только из десятков или сотен деталей. Отказ в работе хотя бы одного ответственного элемента сложной системы без резервирования может привести к нарушению работы всей системы.

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

При недостаточной долговечности машины изготавливают в большем, чем нужно, количестве, что ведет к перерасходу металла, излишкам производственных мощностей, завышению расходов на ремонт и эксплуатацию. Физический срок службы машин в среднем существенно меньше срока морального износа.

Быстрое развитие науки о надежности в период научно-технической революции связано:

а) с автоматизацией, многократным усложнением машин и их соединением в крупные комплексы;

б) задачами безлюдной технологии;
в) непрерывным форсированием машин, уменьшением их металлоемкости, повышением их силовой, тепловой, электрической напряженности.

В теории надежности рассматриваются следующие обобщенные объекты:

изделие — единица продукции, выпускаемая предприятием, цехом и т.д., например, подшипник, ремень, станок, автомобиль;

элемент — простейшая при данном рассмотрении составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей;

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

Понятия «элемент» и «система» трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Машина, например, при установлении ее собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов — механизмов, деталей и т.д., а при изучении автоматической линии — как элемент.

Различают изделия невосстанавливаемые, которые не могут быть восстановлены потребителем и подлежат замене (например, электрические и электронные лампы, подшипники качения и т.д.), восстанавливаемые, которые могут быть восстановлены потребителем (например, станок, автомобиль, радиоприемник).

Основные понятия и термины надежности стандартизованы.

Работоспособность — состояние изделия, при котором оно способно нормально выполнять заданные функции (с параметрами, установленными в технической документации). Работоспособность не касается требований, непосредственно не влияющих на эксплуатационные показатели, например повреждение окраски и т.д.

Исправность — состояние изделия, при котором оно удовлетворяет всем не только основным, но и вспомогательным требованиям. Исправное изделие обязательно работоспособно.

Неисправность — состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. Различают неисправности, не приводящие к отказам, и неисправности и их сочетания, приводящие к отказам.

Отказ — полная или частичная утрата работоспособности. Различают отказы функционирования, при которых выполнение своих функций рассматриваемым элементом или объектом прекращается (например, поломка зубьев шестерни), и отказы параметрические, при которых некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах (например, потеря точности станка).

Причины отказов подразделяют на случайные и систематические. Случайные причины — это предусмотренные перегрузки, дефекты материала и погрешности изготовления, не обнаруженные контролем, ошибки обслуживающего персонала или сбой системы управления. Примеры: твердые включения в обрабатываемую среду, крупные неровности дороги, наезды на препятствия, недопустимые отклонения размеров заготовок или их неправильный зажим, раковины, закалочные трещины. Случайные факторы преимущественно вызывают отказы при действиях в неблагоприятных сочетаниях.

Систематические причины — это закономерные явления, вызывающие постепенное накопление повреждений: влияние среды, времени, температуры, облучения, коррозия, старение, нагрузки и работа трения — усталость, ползучесть, износ, функциональные воздействия, засорения, залипания, утечки.

В соответствии с этими причинами и характером развития и проявления различают отказы внезапные (поломки от перегрузок, заедания), постепенные по развитию и внезапные по проявлению (усталостные разрушения, перегорания ламп, короткие замыкания из-за старения изоляции) и постепенные (износ, старение, коррозия, залипание). Внезапные отказы вследствие своей неожиданности более опасны, чем постепенные. Постепенные отказы представляют собой выходы параметров за границы допуска в процессе эксплуатации или хранения.

По причинам возникновения отказы можно также разделить на конструкционные, вызванные недостатками конструкции, технологические, вызванные несовершенством или нарушением технологии, и эксплуатационные, вызванные неправильной эксплуатацией.

Отказы в соответствии со своей физической природой бывают связаны с разрушением деталей или их поверхностей (поломки, выкрашивание, износ, коррозия, старение) или не связаны с разрушением (засорение каналов подачи топлива, смазки или подачи рабочей жидкости в гидроприводах, ослабление электроконтактов). В соответствии с этим отказы устраняют: заменой деталей, регулированием или очисткой.

По своим последствиям отказы могут быть легкими — легкоустраняемыми, средними, не вызывающими разрушений других узлов, и тяжелыми, вызывающими тяжелые вторичные разрушения, а иногда и человеческие жертвы.

По возможности дальнейшего использования изделия отказы бывают полные, исключаящие возможность работы изделия до их устранения, и частичные, при которых изделие может частично использоваться, например, с неполной мощностью или на пониженной скорости.

По сложности устранения различают отказы, устранимые в порядке технического обслуживания, в порядке среднего или капитального ремонта и по месту устранения — отказы, устранимые в эксплуатационных и стационарных условиях, что особенно существенно для транспортных машин, в частности для автомобилей.

Встречаются также самоустраняющиеся отказы, например, в системе автоматической подачи заготовок на станках.

По времени возникновения отказы можно подразделить на приработочные, возникающие в первый период эксплуатации, связанные с попаданием на сборку дефектных элементов; при нормальной эксплуатации (за период до появления износных отказов); износовые, вызванные старением.

Рассмотрим свойства изделий в аспекте проблемы надежности.

Безотказность (или надежность в узком смысле слова) — свойство непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени или наработки. Это свойство особенно важно для машин, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей или с перерывом в работе большого комплекса машин, с остановкой автоматизированного производства или с браком дорогого изделия.

Долговечность — свойство изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Предельное состояние изделия характеризуется невозможностью его дальнейшей эксплуатации, снижением эффективности или безопасности. Для невосстанавливаемых изделий понятия долговечности и безотказности практически совпадают.

Ремонтопригодность — приспособленность изделия к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособности путем технического обслуживания и ремонта. С усложнением систем все труднее становится находить причины отказов и отказавшие элементы. Так, в сложных электрогидравлических системах станков поиск причин отказа может занимать более 50 % общего времени восстановления работоспособности. Важность ремонтнопригодности машин определяется огромными затратами на ремонт машин в народном хозяйстве.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять значение показателей безотказности, долговечности, ремонтнопригодности после хранения и транспортирования. Практическая роль этого свойства особенно велика для приборов. Так, по американским источникам во время Второй мировой войны около 50 % радиоэлектронного оборудования для военных нужд и запасных частей к нему вышло из строя в процессе хранения.

1.2. Показатели надежности

Показатели надежности различаются в соответствии с компонентами надежности на показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. По восстанавливаемости изделий они делятся на показатели для восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий.

Используют показатели, характеризующие отдельные свойства, и комплексные показатели.

Применяют относительные показатели, характеризующие общий уровень надежности, и абсолютные или числовые показатели, характеризующие отдельные типоразмеры машин.

Надежность изделий в зависимости от их вида может оцениваться частью или всеми показателями надежности.

Показатели безотказности. Вероятность безотказной работы — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет.

Средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки до отказа невосстанавливаемого изделия. Под наработкой понимают продолжительность или объем выполненной работы объекта.

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

Интенсивность отказов — показатель надежности невосстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказавших в единицу времени (или наработки в других единицах) объектов к числу объектов, оставшихся работоспособными. Этот показатель более чувствителен, чем вероятность безотказной работы, особенно для изделий высокой надежности.

Параметр потока отказов — показатель надежности восстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольную малую его наработку к значению этой наработки (соответствует интенсивности отказов для неремонтируемых изделий, но включает повторные отказы).

Показатели долговечности. Технический ресурс (сокращенно ресурс) — наработка объекта от начала его эксплуатации после ремонта до предельного состояния. Ресурс выражается в единицах времени работы (обычно в часах), длины пути (в километрах) и в единицах выпуска продукции. Для невосстанавливаемых изделий понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

Срок службы — календарная наработка до предельного состояния. Выражается обычно в годах.

Для деталей машин в качестве критерия долговечности используется технический ресурс.

Для машин, эксплуатируемых в разных условиях и имеющих более точный показатель, чем календарный срок службы (в частности, для транспортных машин — пробег, для двигателей — мото-часы), также используется *технический ресурс*. Для других машин используется срок службы.

Показатели ремонтпригодности и сохраняемости. К данным показателям относят: среднее время восстановления работоспособного состояния; вероятность восстановления работоспособного состояния в заданное время; сроки сохраняемости и комплексные показатели, применяемые в основном для автоматических комплексов и сложных систем. Комплексные показатели, в свою очередь, характеризуются коэффициентами:

технического использования — отношение математического ожидания времени работоспособного состояния за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени работоспособного состояния и всех простоев для ремонтов и технического обслуживания;

готовности — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме периодов, в которых эксплуатация не предусматривается. Коэффициент определяют как отношение математических ожиданий времени нахождения в работоспособном состоянии к математическим ожиданиям суммы этого времени и времени внепланового ремонта.

1.3. Случайные величины и их характеристики

Внезапные отказы определяются случайными неблагоприятными сочетаниями нескольких факторов. Случайность связана с тем, что причины события остаются для нас скрытыми. Рассеяние ресурсов по критерию усталости (оцениваемое отношением наибольшего ресурса к наименьшему) для подшипников достигает 40, для зубчатых передач 10...15. Рассеяние ресурсов по износу также весьма значительно. Существенные рассеяние имеют действующие нагрузки, механические характеристики материалов и деталей, зазоры и натяги. Поэтому в расчетах надежности многие параметры должны рассматриваться случайными величинами, т.е. такими, которые могут принять то или иное значение, неизвестное заранее. Они могут быть непрерывного или прерывного (дискретного) типа.

Для каждого числа x в диапазоне изменения случайной величины X существует определенная вероятность $p(X < x)$, что X не превосходит x . Эта зависимость $F(x) = p(X < x)$ называется *функцией распределения* или функцией вероятности случайной величины X .

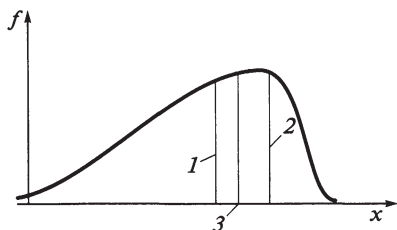


Рис. 1.1. Плотность вероятности и числовые характеристики центра группирования случайной величины:

1 — медиана; 2 — мода; 3 — математическое ожидание

Функция $F(x)$ является неубывающей функцией x (монотонно возрастающей для непрерывных процессов и ступенчато возрастающей для дискретных процессов). В пределах изменения случайной величины X она изменяется от 0 до 1.

Производная от функции распределения по текущей переменной $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$ называется *плотностью распределения*. Она характеризует частоту повторений данного значения случайной величины. В задачах надежности ее широко используют в качестве плотности вероятности.

В ряде случаев достаточно характеризовать распределение случайной величины некоторыми случайными величинами (рис. 1.1): математическим ожиданием (средним значением), модой и медианой, характеризующими положение центров группирования случайных величин по числовой оси, дисперсией, средним квадратическим отклонением, коэффициентом вариации, характеризующими рассеяния случайной величины.

Характеристики распределений используются в статистической трактовке (для обработки результатов наблюдений) и в вероятностной трактовке (для прогнозирования надежности).

Математическое ожидание (среднее значение) m_x — основная и простейшая характеристика случайной величины x . Значение математического ожидания, определяемое по результатам наблюдений как для дискретных, так и для непрерывных величин, называют оценкой математического ожидания или оценкой среднего значения \bar{x} :

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (1.1)$$

или

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{g_i x_i}{N}, \quad (1.2)$$

где N — общее число наблюдений; x_i — значение случайной величины; g_i — число одинаковых значений x_i . Черта над обозначением случайной величины означает среднее значение.

В формуле (1.1) суммируют все N членов, а в формуле (1.2) — число членов с разными значениями x_i . При достаточно большом числе наблюдений (испытаний) полагают, что $m_x = \bar{x}$.

В вероятностных задачах математическое ожидание определяют в зависимости от плотности распределения $f(x)$ (для непрерывных величин) или вероятности p_i появления значений x_i (для дискретных величин):

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx; \quad m_x = \sum_1^N p_i x_i. \quad (1.3)$$

Дисперсия случайной величины — математическое ожидание квадрата отклонения этой величины от ее математического ожидания.

Оценка дисперсии случайной величины — среднее значение квадрата разности между значениями случайной величины и ее средним значением:

$$D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_1^N (x_i - \bar{x})^2, \quad (1.4)$$

или

$$\frac{1}{N-1} \sum_1^N g_i (x_i - \bar{x})^2. \quad (1.5)$$

Слово «дисперсия» означает рассеяние и характеризует разброс случайной величины.

Для непрерывных случайных величин

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx. \quad (1.6)$$

Для дискретных случайных величин

$$D_x = \sum (x_i - m_x)^2 p_i. \quad (1.7)$$

Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины. Поскольку удобнее пользоваться характеристикой рассеяния, имеющей ту же размерность, что и случайная величина, то была введена характеристика — среднее квадратическое отклонение, представляющее собой корень квадратный из дисперсии,

$$S_x = \sqrt{D_x}.$$

Для оценки рассеяния с помощью безразмерной (относительной) величины используют коэффициент вариации, равный отношению среднего квадратического отклонения к математическому ожиданию:

$$v_x = S_x / m_x.$$

Дисперсия и среднее квадратическое отклонение являются гораздо более репрезентативными характеристиками рассеяния, например среднее арифметическое абсолютных значений отклонений.

Квантиль — это среднее значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности. Квантиль, соответствующая вероятности 0,5, называется *медианой*. Медиана характеризует расположение центра группирования случайной величины. Площадь под графиком функции плотности распределения делится медианой пополам.

Для характеристики рассеяния случайной величины используют также вероятностное отклонение, равное половине разности квантилей $x_{0,75}$ и $x_{0,25}$, т. е. значений случайной величины, соответствующих вероятностям 0,75 и 0,25.

Мода случайной величины — наиболее вероятное значение или, иначе, то ее значение, при котором плотность вероятности максимальна.

Аналогично с предыдущими характеристиками трансформируются термины мода и медиана в статистической трактовке. Для симметричного модального (т. е. имеющего один максимум) распределения математическое ожидание, мода и медиана совпадают.

1.4. Оценка параметров надежности

Существенное рассеяние основных параметров надежности предопределяет необходимость рассматривать ее в вероятностном аспекте.

Как было показано ранее на примере характеристик распределений, параметры надежности используются в статистической трактовке для оценки состояния и в вероятностной трактовке — для прогнозирования. Первые выражаются в дискретных числах, их в теории вероятностей и математической теории надежности называют *оценками*. При достаточно большом количестве испытаний они принимаются за истинные характеристики надежности.

Рассмотрим проведенные для оценки надежности испытания или эксплуатацию значительного числа N элементов в течение

времени t (или наработки в других единицах). Пусть к концу испытания или срока эксплуатации останется N_p работоспособных (неотказавших) элементов и n отказавших.

Тогда относительное число отказов

$$q(t) = n / N.$$

Если испытание проводится как выборочное, то $q(t)$ можно рассматривать как статистическую оценку вероятности отказа или, если N достаточно велико, как вероятность отказа.

В дальнейшем в случаях, когда необходимо подчеркивать отличие оценки вероятности от истинного значения вероятности, оценка будет дополнительно помечаться знаком «*», в частности $q^*(t)$.

Вероятность безотказной работы оценивается относительным числом работоспособных элементов

$$p(t) = \frac{N_p}{N} = 1 - \frac{n}{N}. \quad (1.8)$$

Поскольку безотказная работа и отказ — взаимно противоположные события, то сумма их вероятностей равна 1:

$$p(t) + q(t) = 1.$$

Это же следует из приведенных ранее зависимостей:

при $t = 0$ $n = 0$, $q(t) = 0$ и $p(t) = 1$;

при $t = \infty$ $n = N$, $q(t) = 1$ и $p(t) = 0$.

Распределение отказов по времени характеризуется функцией плотности распределения $f(t)$ наработки до отказа. В статистической трактовке

$$f(t) = \frac{\Delta n}{N \Delta t} = \frac{\Delta q(t)}{\Delta t}, \quad (1.9)$$

в вероятностной трактовке

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

Здесь Δn и $\Delta q(t)$ — приращение числа отказавших объектов и соответственно вероятности отказов за время Δt .

Вероятности отказов и безотказной работы в функции плотности $f(t)$ выражаются следующими зависимостями:

$$q(t) = \int_0^t f(t) dt; \quad \text{при } t = \infty \quad q(t) = \int_0^\infty f(t) dt = 1; \quad (1.10)$$

$$p(t) = 1 - q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt. \quad (1.11)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ в отличие от плотности распределения относится к числу объектов N_p , оставшихся работоспособными, а не к общему числу объектов. Соответственно в статистической трактовке

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{N_p \Delta t} \quad (1.12)$$

и в вероятностной трактовке, учитывая, что $N_p/N = p(t)$,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}. \quad (1.13)$$

Получим выражение для вероятности безотказной работы в зависимости от интенсивности отказов. Для этого в выражение (1.13) подставим $f(t) = -\frac{dp(t)}{dt}$, разделим переменные и проинтегрируем:

$$\frac{dp(t)}{p(t)} = -\lambda(t)dt; \ln p(t) = -\int_0^t \lambda(t)dt; \quad (1.14)$$

$$p(t) = e^{\int_0^t \lambda(t)dt}. \quad (1.15)$$

Соотношение (1.15) является одним из основных уравнений теории надежности.

К числу важнейших общих зависимостей надежности относятся зависимости надежности систем от надежности элементов.

Рассмотрим надежность наиболее характерной для машиностроения простейшей расчетной модели системы из последовательно соединенных элементов (рис. 1.2), у которой отказ каждого элемента вызывает отказ системы, а отказы элементов принимаются независимыми.

Используем известную теорему умножения вероятностей, согласно которой вероятность произведения, т. е. совместного проявления независимых событий, равна произведению вероятностей

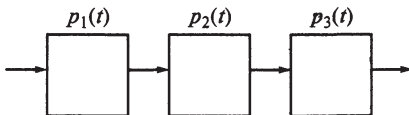


Рис. 1.2. Структурная схема надежности последовательной системы

этих событий. Следовательно, вероятность безотказной работы системы равна произведению вероятностей безотказной работы отдельных элементов:

$$p_c(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t). \quad (1.16)$$

Если $p_1(t) = p_2(t) = \dots = p_n(t)$, то $p_c(t) = p_1^n(t)$, поэтому надежность сложных систем получается низкой. Например, если система состоит из 10 элементов с вероятностью безотказной работы 0,9 (как в подшипниках качения), то общая вероятность составляет $0,9^{10} \approx 0,35$.

Обычно вероятность безотказной работы элементов достаточно высокая, поэтому, выразив $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ через вероятности отказов и пользуясь теорией приближенных вычислений, получим

$$\begin{aligned} p_c(t) &= [1 - q_1(t)][1 - q_2(t)]\dots[1 - q_n(t)] \approx \\ &\approx 1 - [q_1(t) + q_2(t) + \dots + q_n(t)], \end{aligned} \quad (1.17)$$

так как произведениями двух малых величин можно пренебречь. При $q_1(t) = q_2(t) = \dots = q_n(t)$ получаем $p_c = 1 - nq_1(t)$. Пусть в системе из шести одинаковых последовательных элементов $p_1(t) = 0,99$, тогда $q_1(t) = 0,01$ и $p_c(t) = 0,94$.

Вероятность безотказной работы нужно уметь определять для любого промежутка времени. По теореме умножения вероятностей

$$p(T + t) = p(T)p(t) \text{ или } p(t) = \frac{p(T + t)}{p(T)}, \quad (1.18)$$

где $p(T)$ и $p(T + t)$ — вероятности безотказной работы за время T и $T + t$ соответственно; $p(t)$ — условная вероятность безотказной работы за время t (термин «условная» здесь введен, поскольку предполагается, что изделия не имели отказа до начала интервала времени или наработки).

1.5. Различные периоды работы технических устройств

При рассмотрении работоспособности какого-либо технического устройства или изделия различают три периода его «жизни»: период приработки, когда при испытании устройства или изделия происходит отбраковка конструктивных, технологических и производственных дефектов, период нормальной эксплуатации, ха-

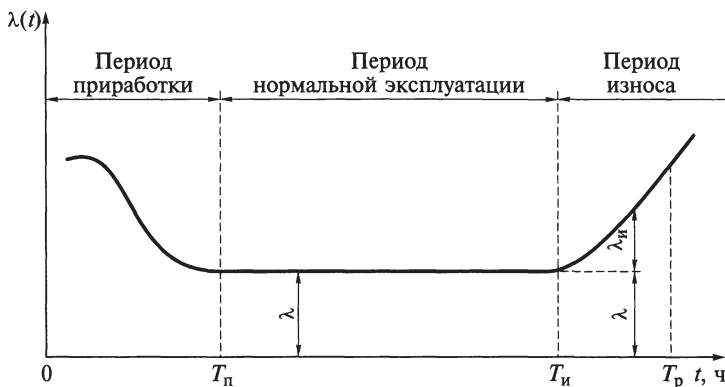


Рис. 1.3. Функция интенсивности $\lambda(t)$ отказов экспоненциального распределения

характеризующийся внезапными отказами приблизительно постоянной интенсивности, и период старения, когда появляются отказы возрастающей интенсивности, вызываемые износом устройства или изделия (рис. 1.3).

Из всех этих периодов «жизни» технического устройства главным является период нормальной эксплуатации, который характеризуется длительной работой устройства или машины при определенных климатических и других условиях применения.

Период нормальной эксплуатации устройства. В период нормальной эксплуатации технического устройства обычно происходят внезапные отказы, которые носят случайный характер. Физическая природа таких отказов обусловлена внезапной концентрацией нагрузок, действующих внутри и вне устройства. Случайность возникновения внезапных отказов проявляется в том, что события происходят неожиданно и нерегулярно. Однако в достаточно большие и приблизительно равные промежутки времени они повторяются примерно с одинаковой интенсивностью.

После периода приработки устройства, в котором интенсивность отказов повышенная, наступает период нормальной эксплуатации, в течение которого имеет место наиболее низкий уровень интенсивности внезапных отказов приблизительно постоянной величины. В этом случае экспоненциальная зависимость во времени надежности по уравнению (1.15) служит достаточной аппроксимацией событий.

На рис. 1.3 представлена примерная кривая зависимости интенсивности отказов в работе технического устройства λ от времени эксплуатации t для трех характерных периодов его работы — периода приработки, периода нормальной эксплуатации и перио-

да износа. К такому устройству может быть отнесена и электрическая машина. Как показывает эта кривая, в начале периода приработки машины интенсивность отказа в ее работе может быть высока, затем она падает, и к моменту времени $t = T_{\text{п}}$ — началу периода нормальной эксплуатации — интенсивность отказов становится минимальной и в среднем приблизительно постоянной величиной

$$\lambda \approx 1/T_{\text{ср}},$$

где $T_{\text{ср}}$ — средняя наработка до первого отказа машины или устройства, ч.

Когда время эксплуатации машины или устройства достигает значения $t = T_{\text{и}}$, начинает сказываться износ их частей. С этого момента интенсивность отказов в работе начинает быстро возрастать, так что за период работы машины или устройства с $T_{\text{и}}$ до $T_{\text{р}}$ вероятность отказов их может достигнуть примерно 0,5, или 50 %. Время $T_{\text{р}}$ можно назвать средним значением времени долговечности машины или устройства с учетом износа, или их техническим ресурсом, при условии отсутствия ремонта. Однако при проведении ремонта машины или устройства путем замены изношенных частей и исправления других дефектов срок службы их может быть соответственно увеличен.

Время эксплуатации машины или устройства $T_{\text{и}}$ при постоянной интенсивности отказов в работе λ всегда меньше долговечности, или технического ресурса $T_{\text{р}}$. Вместе с тем среднее время безотказной работы машины, или средняя наработка до первого отказа, $T_{\text{ср}} = 1/\lambda$ обычно гораздо больше, чем ее долговечность, или технический ресурс $T_{\text{р}}$. Например, если в течение периода нормальной эксплуатации интенсивность внезапных отказов в работе машины или устройства λ невелика, то значение времени $T_{\text{ср}}$ может достигать очень большой величины, измеряемой нередко десятками или сотнями тысяч часов. Это время указывает, насколько надежна машина или устройство в период нормальной эксплуатации t .

Период износа устройства. Высокую надежность технического устройства, в том числе и электрической машины, на продолжительный период можно обеспечить посредством соответствующей приработки, которая позволяет исключить приработочные отказы, и с помощью профилактического ремонта устройства путем замены изношенных частей и исправления других его дефектов.

Высокая надежность технического устройства — это низкая интенсивность отказов в работе и, следовательно, большое среднее время безотказной работы, или средняя наработка до первого отказа $T_{\text{ср}}$. Время $T_{\text{ср}}$ (рис. 1.4) — некоторое среднее время, за ко-

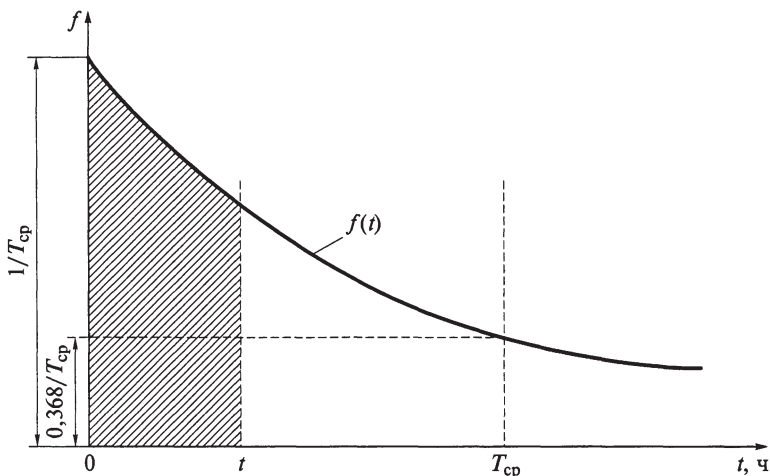


Рис. 1.4. График плотности вероятности $f(t)$ и среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}}$

торое возникает отказ в работе устройства. Поскольку это только среднее время, то на практике следует ожидать, что в некоторых случаях отказы в работе устройства могут возникать значительно раньше этого времени, а в других — позже его. Поэтому в общем случае нельзя считать, что техническое устройство или машина будет безотказно работать обязательно все $T_{\text{ср}}$ часов. Надежная работа устройства реально получается только для интервала времени, значительно меньшего средней наработки до первого отказа $T_{\text{ср}}$.

Как указывалось ранее, внезапные отказы технического устройства постоянной интенсивности подчиняются экспоненциальному распределению, а износные отказы после периода нормальной эксплуатации $T_{\text{и}}$ (см. рис. 1.3) — приблизительно нормальному распределению во времени. Плотность вероятности отказов $f(t)$, представляющая собой (см. рис. 1.4) степень убывания надежности $p(t)$ во времени, будет иметь следующий вид для указанных распределений. Так, например, для внезапных отказов устройства их плотность вероятности

$$f(t) = \frac{1}{T_{\text{ср}}} e^{-\frac{t}{T_{\text{ср}}}}, \quad (1.19)$$

где t — время работы устройства, ч.

Плотность же вероятности износных отказов $f(T)$ с учетом обозначений, принятых на рис. 1.3, будет

$$f(T) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}}}{\sigma \left[1 + \Phi \left(\frac{T_p}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right]} e^{-\frac{(T-T_p)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.20)$$

где T — общее время эксплуатации или работы технического устройства, ч; T_p — среднее значение долговечности, или технический ресурс устройства, ч; σ — среднее квадратическое отклонение времени между отказами, или стандартное отклонение от среднего значения долговечности, или технического ресурса, T_p ;

$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T - T_p)^2}{r}}$, при этом r — число отказов в работе устройства,

происходящих спустя время T , которые суммируются в выражении $\sum_{T_p} (T - T_p)^2$; $\Phi \left(\frac{T_p}{\sigma\sqrt{2}} \right)$ — интеграл вероятности, определяемый по

справочникам для значения $\frac{T_p}{\sigma\sqrt{2}}$.

На рис. 1.4 представлена кривая плотности вероятности внезапных отказов $f(T)$ устройств для экспоненциального распределения, а на рис. 1.5 — кривая плотности износных отказов $f(T)$ для нормального распределения. Вероятность внезапного отказа в работе устройства для промежутка времени от 0 до t будет представлять собой определенный интеграл от плотности вероятности отказов $f(t)$ из уравнения (1.9) в пределах от 0 до t :

$$q(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-t/T_{cp}}, \quad (1.21)$$

т.е. вероятность внезапного отказа устройства численно будет определяться заштрихованной площадью под кривой плотности вероятности отказов $f(t)$ (см. рис. 1.5). Общая площадь под этой кривой за бесконечно большой промежуток времени для экспоненциального случая $f(t)$ будет

$$q(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = 1 - e^{-t/T_{cp}} \Big|_0^{\infty} = 1. \quad (1.22)$$

Следовательно, вероятность отказа в работе устройства за этот промежуток времени равна 100 %.

Приработочные отказы устройства. Рассмотренные ранее два периода жизни технического устройства — период нормальной

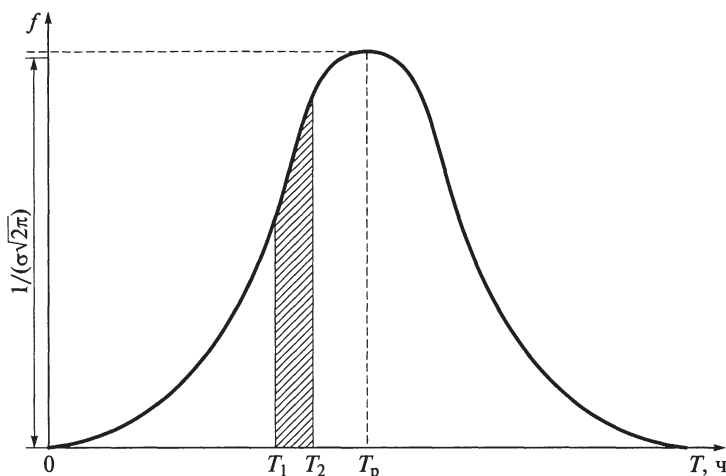


Рис. 1.5. Кривая плотности износных отказов $f(T)$ для нормального распределения:

T_p — среднее время нормальной работы группы (партии) изделий; T_1 и T_2 — времена начала износных отказов для конкретных двух изделий из партии

эксплуатации и период износа — характеризуют собой соотношение работоспособности и надежности его с внезапными и износными отказами в работе (см. рис. 1.3). Период нормальной эксплуатации соответствует работе устройств как однократного, так и многократного использования, период же износа относится только к ремонтируемым устройствам многократного использования.

Последние периодически проходят необходимый ремонт, во время которого производится замена изношенных или дефектных частей. Эти два периода жизни технического устройства являются главными для характеристики его надежности.

Однако, кроме внезапных и износных отказов в работе какого-либо устройства, существуют еще приработочные отказы, которые могут также оказывать некоторое неблагоприятное влияние на его надежность. Для ряда технических устройств приработочные отказы устраняются в течение первого периода работы устройства обычно путем замены дефектных деталей исправными или их приработки, если это допускается конструкцией устройства. Например, в коллекторных или других электрических машинах перед выпуском их с промышленного предприятия-изготовителя в нормальную эксплуатацию предварительно производится притирка и приработка щеток на коллекторе или контактных кольцах, проверка состояния изоляции обмоток, наладка подшипниковых узлов и выполняются другие контрольные испытания машин.

1.6. Надежность в период нормальной эксплуатации

В период нормальной эксплуатации постепенные отказы еще не проявляются и надежность характеризуется внезапными отказами. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность, которая не зависит от возраста изделия:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const}, \quad (1.23)$$

где $\lambda = 1/m_t$; m_t — средняя наработка до отказа (обычно в часах). Тогда λ выражается числом отказов в час и, как правило, составляет малую дробь.

Вероятность безотказной работы

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t} \quad (1.24)$$

подчиняется экспоненциальному закону распределения времени безотказной работы и одинакова за любой одинаковый промежуток времени в период нормальной эксплуатации.

Экспоненциальным законом распределения можно аппроксимировать время безотказной работы широкого круга объектов (изделий): особо ответственных машин, эксплуатируемых в период после окончания приработки и до существенного проявления постепенных отказов; элементов радиоэлектронной аппаратуры; машин с последовательной заменой отказавших деталей; машин вместе с электро- и гидрооборудованием и системами управления и др.; сложных объектов, состоящих из многих элементов (при этом время безотказной работы каждого может не быть распределено по экспоненциальному закону; нужно только, чтобы отказы одного элемента, не подчиняющегося этому закону, не доминировали над другими).

Существенное достоинство экспоненциального распределения — его простота: оно имеет только один параметр.

В большинстве случаев $\lambda t \leq 0,1$ и формула для вероятности безотказной работы упрощается в результате разложения в ряд и отбрасывания малых членов:

$$p(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t. \quad (1.25)$$

Плотность распределения (в общем случае)

$$f(t) = -\frac{dp(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (1.26)$$

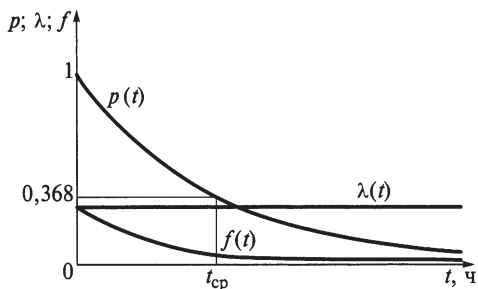


Рис. 1.6. Функции вероятности $p(t)$ безотказной работы, плотности вероятности $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ экспоненциального распределения

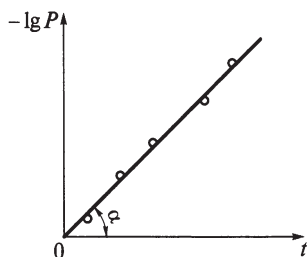


Рис. 1.7. Графическое определение вероятности безотказной работы по результатам экспериментов

Ниже приведены значения вероятности безотказной работы в зависимости от $\lambda(t)t \approx t/m_t$, см. формулу (1.24) (рис. 1.6):

$\lambda(t)t$	1	0,1	0,01	0,001	0,0001
$p(t)$	0,368	0,9	0,99	0,999	0,9999

Поскольку при $t/m_t = 1$ вероятность $p(t) \approx 0,37$, то 63 % отказов возникает за время $t < m_t$ и только 37 % позднее. Из приведенных значений следует, что для обеспечения требуемой вероятности безотказной работы 0,9 или 0,99 можно использовать только малую долю среднего срока службы (соответственно 0,1 и 0,01).

Если работа изделия происходит в разных режимах, а следовательно, и интенсивностях отказов λ_1 (за время t_1) и λ_2 (за время t_2), то

$$p(t) = e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}. \quad (1.27)$$

Эта зависимость следует из теоремы умножения вероятностей.

Для определения на основании опытов интенсивности отказов λ сначала оценивают среднюю наработку до отказа

$$m_t \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \sum t_i, \quad (1.28)$$

где N — общее число наблюдений. Тогда $\lambda = 1/\bar{t}$.

Можно также воспользоваться графическим способом (рис. 1.7) — нанести экспериментальные точки в координатах t и $-\lg p(t)$. Знак «-» выбирают потому, что $p(t) < 1$ и, следовательно, $\lg p(t)$ — отрицательная величина. Тогда, логарифмируя выражение для вероятности безотказной работы: $\lg p(t) = -\lambda t \lg e = -0,4343 \lambda t$, получаем тангенс угла прямой, проведенной через экспериментальные точки $\operatorname{tg} \alpha = 0,4343 \lambda$, откуда $\lambda = 2,3 \operatorname{tg} \alpha$.

При использовании графического способа нет необходимости доводить до конца испытания всех образцов.

Для системы

$$p_c(t) = e^{-\sum \lambda_i t}.$$

Если $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_3$,

то

$$p_{ст}(t) = e^{-n\lambda_1 t}. \quad (1.29)$$

Таким образом, вероятность безотказной работы системы, состоящей из элементов с вероятностью безотказной работы, подчиняющихся экспоненциальному закону, также подчиняется экспоненциальному закону. При этом интенсивности отказов отдельных элементов складываются.

Используя экспоненциальный закон распределения, несложно определить среднее число изделий n , которые выйдут из строя к заданному моменту времени, и среднее число изделий N_p , которые останутся работоспособными. При $\lambda t \leq 0,1$ $n \approx N\lambda t$; $N_p \approx N(1 - \lambda t)$.

Пример 1.1. Оценить вероятность $p(t)$ отсутствия внезапных отказов механизма в течение $t = 10\,000$ ч, если интенсивность отказов составляет $\lambda = 1/m_i = 10^{-8}$ ч⁻¹.

Решение. Поскольку $\lambda t = 10^{-8} \cdot 10^4 = 10^{-4} < 0,1$, то воспользуемся приближенной зависимостью $p(t) = 1 - \lambda t = 1 - 10^{-4} = 0,9999$.

1.7. Надежность в период постепенных отказов, возникающих из-за износа и старения

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

В связи с многообразием причин и условий возникновения отказов в этот период для описания надежности применяют несколько законов распределений, которые устанавливают путем аппроксимации результатов испытаний или наблюдений в эксплуатации.

Нормальное распределение является наиболее универсальным, удобным и широко применяемым для практических расчетов (рис. 1.8 и 1.9). Распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие примерно равнозначные факторы (см. рис. 1.8, а). Нормальному распределению подчиняется наработка до отказа

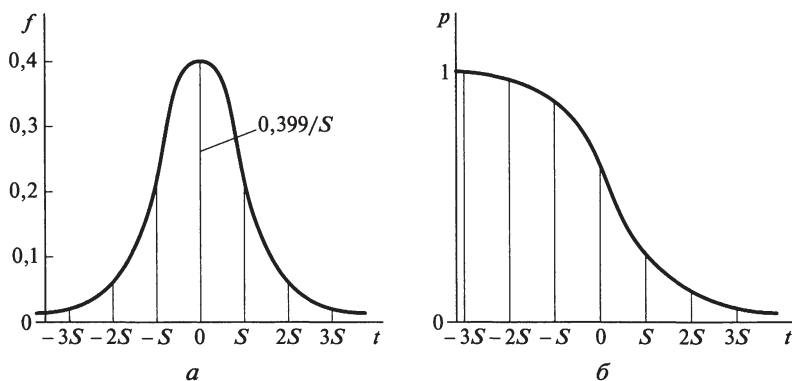


Рис. 1.8. Функция плотности вероятности (а) и интегральная функция вероятности усеченного нормального распределения (б)

многих восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, размеры и ошибки измерений деталей и т.д.

Плотность распределения

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_{\tau})^2}{2S^2}}. \quad (1.30)$$

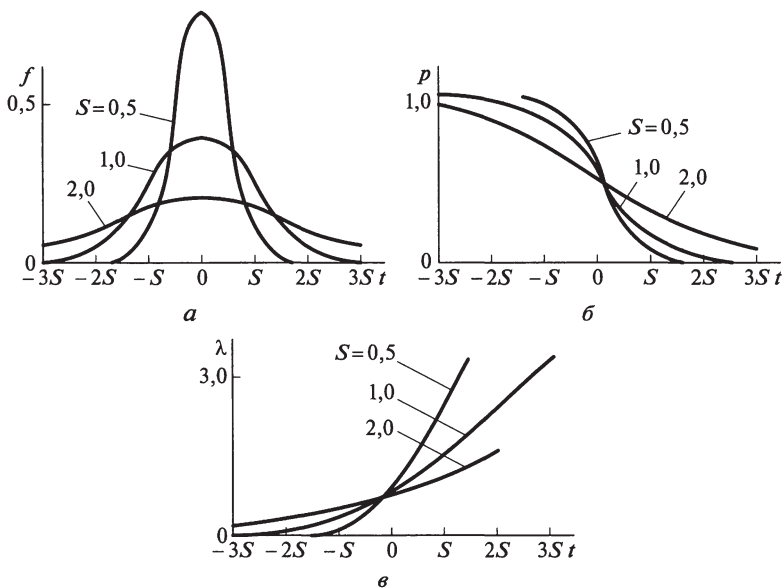


Рис. 1.9. Основные характеристики нормального распределения при разных значениях среднего квадратического отклонения:

a — плотность вероятности $f(t)$; b — вероятность безотказной работы $p(t)$; c — интенсивность отказов $\lambda(t)$