Надёжность информационных систем. Лекции 1–3. Основные понятия теории надёжности

Макаров П. А.

11, 25 сентября и 9 октября 2026 г.

Содержание

1 Введение **1**

2 Источники информации **3**

3 Терминологический аппарат **3**

4 Классификация объектов по надёжности **24**

5 Способы обеспечения надёжности ИС **28**

6 Основные количественные показатели надёжности **29**

7 Типовые законы распределения **36**

8 Контрольные вопросы и задания **42**

Список литературы **42**

1 Введение

Теория надёжности — это прикладная наука, сформировавшаяся во второй половине XX века в результате синтеза различных разделов математики, физики и их инженерных приложений. Предметом теории надёжности являются закономерности возникновения отказов, количественная оценка и методы обеспечения работоспособности технических вообще и информационных систем в частности.

Специфика информационных систем (ИС) состоит в том, что для них надёжность определяется целым рядом составляющих: не только аппаратной

частью, но и программным обеспечением, сетевой инфраструктурой, а также человеческим фактором.

1.1 Качество технических систем

Надёжность технических объектов и систем тесно связана с их качеством. При этом под качеством понимают комплексное свойство, включающее в себя целую совокупность отдельных характеристик.

1. **Показатели назначения.** Характеризуют свойства системы, определяющие основные функции, для выполнения которых она предназначена, и обусловливают область её применения.

2. **Показатели надёжности.** Характеризуют способность объекта выполнять свои функции в определённых условиях эксплуатации в течение заданного времени.

3. **Эргономические показатели.** Описывают удобство использования и обслуживания объекта человеком.

4. **Эстетические показатели.** Характеризуют информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции и совершенство исполнения объекта, стабильность товарного вида.

5. **Показатели технологичности.** Описывают удобство и простоту изготовления и эксплуатации объекта.

6. **Показатели транспортабельности.** Характеризуют приспособленность объекта к перемещению без эксплуатации, а также к операциям, связанным с его транспортированием.

7. **Показатели унификации и стандартизации.** Характеризуют степень наполнения объекта стандартными, унифицированными и оригинальными элементами.

8. **Патентно-правовые показатели.** Характеризуют степень обновления технических решений, их патентную защиту.

9. **Экологические показатели.** Характеризуют уровень вредного воздействия на окружающую среду при хранении, транспортировке, эксплуатации и ликвидации объекта.

10. **Показатели безопасности.** Характеризуют безопасность человека при хранении, транспортировке, эксплуатации и ликвидации объекта.

11. **Показатели экономичности.** Характеризуют техническое совершенство объекта по уровню потребления им сырья, материалов, топлива и энергии при эксплуатации.

Из приведённого выше списка показателей видно, что исследованиям в области качества технических систем посвящён целый ряд прикладных наук (в том числе и теория надёжности). Последняя выполняет при этом ряд своих узко-специализированных задач.

2 Источники информации

1. Узко-направленная литература (краткие лекции и учебные пособия): [1—4].
2. Основная литература (расширенные учебники и монографии): [5—8].
3. Дополнительная литература: [9—14].
4. Межгосударственные стандарты и ГОСТы: [15; 16].
5. Техническая документация и т. п.

3 Терминологический аппарат

Теория надёжности оперирует чрезвычайно богатым набором понятий, которые зачастую созвучны словам, используемым в бытовой повседневности. В профессиональной деятельности, однако, не следует опираясь на эту близость ошибочно отождествлять те или иные термины с похожими на них словами из обыденной речи. Это связано с тем, что все понятия в теории надёжности (как и в любой другой науке) имеют вполне конкретное специфическое содержание. Особенность теории надёжности как инженерной науки состоит в том, что её терминологический аппарат зафиксирован в форме официальных документов — стандартов, содержанием которых необходимо руководствоваться в работе.

При этом большой проблемой является то, что стандартов, посвящённых терминологии в области надёжности техники, за последние несколько десятков лет было выпущено достаточно много, а ориентироваться в этой документации очень непросто. Дополнительную проблему создаёт то, что учебные пособия по теории надёжности выпущенные в разные годы опирались на различные актуальные своему времени стандарты. В связи с этим имеют место различия в определениях (например, трактовки понятий «неисправность», «отказ» или «повреждение»), которые могут приводить к юридическим и техническим спорам.

В связи с этим, приведём ниже краткую хронологию стандартизации в области надёжности технических систем.

1. ГОСТ 27.002-89 [17] — это фундаментальный межгосударственный стандарт, созданный в советскую эпоху и ставший базой для всей отечественной системы стандартов «Надёжность в технике» (ССНТ). Этот стандарт опирался на отечественную научную школу, из-за чего подходы к классификации дефектов и отказов существенно отличались от иных международных стандартов. Действие ГОСТ 27.002-89 на территории РФ было прекращено 1 января 2011 года.

2. ГОСТ Р 53480-2009 [18] — это национальный стандарт РФ, который внедрялся для замены устаревшего советского аналога. Главное концептуальное отличие заключается в том, что ГОСТ Р 53480-2009 базировался на международном документе IEC 60050-191[1]. Вскоре после выпуска официальное обозначение этого стандарта было изменено на ГОСТ Р 27.002-2009, чтобы восстановить логику нумерации системы ССНТ. Однако ГОСТ Р 53480-2009 (он же ГОСТ Р 27.002-2009) уже в 2012 также утратил силу и был отменен.

3. В период 2012 – 2017 гг. вновь действующим был установлен ГОСТ 27.002-89.

4. В качестве переходного этапа с 1 марта 2017 г. в РФ применялся ГОСТ 27.002-2015, но сегодня он тоже не действует.

5. По состоянию на 2026 год актуальным (введённым в действие с 01.01.2022) стандартом для разработки новой нормативной документации в России является ГОСТ Р 27.102-2021 [15]. Данный документ разработан с учётом основных нормативных положений международного стандарта IEC 60050-192:2015 “Международный электротехнический словарь. Часть 192. Надёжность” [16].

Из всего этого вытекают следующие сценарии практического применения различных стандартов.

- ГОСТ 27.002-89 применяется исключительно для обеспечения обратной совместимости (legacy). Его используют для чтения старой конструкторской документации, а также при эксплуатации оборудования, в паспортах которого требования по надёжности жёстко привязаны к формулировкам 1989 года.

- ГОСТ Р 53480-2009 в качестве нормативного документа больше не применяется. Его целесообразно использовать лишь как справочное пособие при переводе иностранной литературы[2], поскольку его терминология максимально близка к международной практике МЭК.

- В странах СНГ вместо ГОСТ 27.002-89 чаще действует принятый позже межгосударственный ГОСТ 27.002-2015.

Обсудим ещё один немаловажный на практике вопрос, а именно — *“Что делать, если одни и те же термины разные стандарты определяют по-разному?”* Для разрешения этой коллизии в инженерной и договорной практике применяются следующие правила.

1. **Приоритет действующего стандарта.** При написании новых технических условий (ТУ), руководств по эксплуатации или стандартов

[1] Сам этот стандарт, в свою очередь, также уже не является действующим. Вместо него применяется стандарт IEC 60050-192:2015 [16].

[2] И даже для этой задачи лучше использовать актуальный ГОСТ Р 27.102-2021 [15].

организаций (СТО) вы обязаны опираться только на актуальный ГОСТ Р 27.102-2021 [15].

2. **Историческая привязка к объекту.** Если вы проводите модернизацию или диагностику изделия, спроектированного в XX веке, вы должны использовать терминологию ГОСТ 27.002-89 [17]. Это необходимо для того, чтобы новые отчёты не противоречили исходному техническому заданию и старым актам испытаний.

3. **Договорной приоритет.** В контрактах на выполнение НИОКР или поставку сложной техники всегда включайте отдельный раздел «Термины и определения». В нём следует прямо указать: *"Термины используются в значениях, определённых ГОСТ [выбранный стандарт]"*, что снимает любые разночтения между сторонами.

4. **Создание таблиц соответствия.** При разработке комплексной документации формируйте внутренний глоссарий. В нём нужно явно прописывать эквиваленты (например, указывать, какой термин из советского стандарта соответствует термину Failure или Fault из международного словаря МЭК).

Теперь перейдём к краткому обзору терминологии, принятой в области технической надёжности, согласно актуальному ГОСТ Р 27.102-2021 [15]. Так, в этом документе различают следующие категории терминов и определений (всего более ста наименований).

1. Термины, относящиеся к структуре стандарта.
2. Термины, относящиеся к понятию надёжности.
3. Термины, относящиеся к состоянию объекта.
4. Термины, относящиеся к временным понятиям.
5. Термины, относящиеся к отказам, дефектам, повреждениям.
6. Термины, относящиеся к техническому обслуживанию, восстановлению и ремонту.
7. Термины, относящиеся к показателям надёжности.
8. Термины, относящиеся к показателям безотказности.
9. Термины, относящиеся к показателям долговечности.
10. Термины, относящиеся к показателям ремонтопригодности и восстанавливаемости.
11. Термины, относящиеся к показателям сохраняемости.

12. Термины, относящиеся к комплексным показателям надёжности.
13. Термины, относящиеся к разработке, обеспечению и анализу надёжности.
14. Термины, относящиеся к резервированию.
15. Термины, относящиеся к испытаниям на надёжность.

Поскольку воспроизводить все термины согласно ГОСТ Р 27.102-2021 [15] нет никакой необходимости, далее мы ограничимся только их перечислением в рамках каждой категории и приведём определения важнейших из них.

3.1 Термины, относящиеся к структуре стандарта

Полный список терминов [15]: объект; элемент; система; подсистема.

Опр. 1. ***Объект / Item*** **:** Предмет рассмотрения, на который распространяется терминология в области надёжности.

Примечания:

1. Объектом может быть сборочная единица, деталь, компонент, элемент, устройство, функциональная единица, оборудование, изделие, система, сооружение.
2. Объект может включать в себя обеспечение, персонал или их комбинации.
3. Объект может быть основным, резервируемым или резервным.

Термины в области надёжности объекта распространяются на любые объекты — изделия, сооружения, системы, а также их подсистемы и составные части на этапах проектирования, производства, испытаний, эксплуатации и ремонта. В качестве подсистем и составных частей могут рассматриваться сборочные единицы, детали, компоненты или элементы. При необходимости в понятие «объект» могут быть включены информация и её носители, а также персонал (человеческий фактор), например, при рассмотрении надёжности системы «человек — машина». Понятие «эксплуатация» включает в себя помимо применения по назначению техническое обслуживание, ремонт, хранение и транспортирование.

Термин «объект» может относиться к конкретному объекту и к одному из представителей совокупности, в частности к любому представителю серии, партии или статистической выборки однотипных объектов. На стадии разработки термин «объект» применяют по отношению к любому представителю генеральной совокупности объектов.

Опр. 2. ***Элемент / Element*** **:** Объект, у которого отсутствуют (или в рамках данного исследования не рассматривают) составные части.

Опр. 3. ***Система / System*** **:** Объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определённом контексте как единое целое, отделённое от окружающей среды.

Примечания:

1. Для системы обычно определяют конкретную цель, например выполнение требуемых функций.
2. Для системы, как правило, установлена граница, отделяющая её от окружающей среды и других систем. Если такая граница не установлена, систему называют открытой системой.
3. На работу системы может влиять окружающая среда. Для работы системы могут требоваться внешние ресурсы (не входящие в границы системы).

Опр. 4. ***Подсистема / Subsystem*** **:** Часть системы, представляющая собой систему.

3.2 Термины, относящиеся к понятию надёжности

Полный список терминов [15]: надёжность (объекта); безотказность; готовность (объекта); ремонтопригодность; восстанавливаемость; долговечность; сохраняемость.

Опр. 5. ***Надёжность (объекта) / Dependability (of item)*** **:** 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.

Примечание: Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость или определённые сочетания этих свойств.

Границ понятия «надёжность объекта» не изменяет следующее определение: надёжность объекта — свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Это определение применяют, когда параметрическое описание нецелесообразно (например, для простейших объектов, работоспособность которых характеризуется по типу «да — нет») или невозможно (например, для систем «машина — оператор», т. е. таких систем, не все свойства которых могут быть охарактеризованы количественно).

К параметрам, характеризующим способность выполнять требуемые функции, относят кинематические и динамические параметры, показатели конструкционной прочности, показатели точности функционирования, производительности, скорости и т. п. С течением времени значения этих параметров могут изменяться.

Надёжность объекта — комплексное свойство, охватывающее в общем случае безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость. Например, для неремонтируемых объектов основным свойством может являться безотказность. Для ремонтируемых объектов одним из важнейших свойств может быть ремонтопригодность.

Следует подчеркнуть принципиальное отличие понятия «надёжность объекта», приведённого в ГОСТ Р 27.102-2021 [15], от понятия «надёжность выполнения задания», приведённого в ГОСТ Р 27.101 [19]. Эти термины относятся к различным понятиям.

Так, «надёжность выполнения задания» зависит от надёжности объекта, его восстанавливаемости, ремонтопригодности, обеспеченности техническим обслуживанием, а в некоторых случаях и от других характеристик, таких как безопасность.

«Надёжность объекта» характеризует свойство объекта, а не возможность выполнения задания при его участии. «Надёжность объекта» не зависит от готовности, восстанавливаемости, обеспеченности техническим обслуживанием.

Для объектов, которые являются потенциальным источником опасности, важными понятиями являются «безопасность» и «живучесть». Безопасность — свойство объекта при изготовлении и эксплуатации в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды. Хотя безопасность не входит в общее понятие надёжности объекта, однако при определённых условиях она тесно связана с этим понятием, например если отказы могут привести к условиям, вредным для людей и окружающей среды сверх предельно допустимых норм.

Понятие «живучесть» занимает пограничное место между понятиями «надёжность» и «безопасность» объекта. Под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять работоспособность при наличии дефектов или повреждений определённого вида, а также при отказе некоторых компонентов. При этом работоспособность может быть не полной. Примером служит сохранение несущей способности элементами конструкции при возникновении в них усталостных трещин, размеры которых не превышают заданных значений.

Опр. 6. ***Безотказность / Reliability*** **:** Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Безотказность в той или иной степени свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования. В основном безотказность рассматривают применительно к использованию объекта по назначению, но во многих случаях необходима оценка безотказности при хранении и транспортировании объекта.

Необходимо подчеркнуть, что показатели безотказности вводят либо по отношению ко всем возможным отказам объекта, либо по отношению к какому-либо одному виду отказов с указанием критерия отказа.

Опр. 7. ***Готовность (объекта) / Availability (of item)*** **:** Способность объекта выполнять требуемые функции в заданных условиях, в заданный

момент или период времени при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Примечания:

1. Надёжность объекта и готовность объекта не зависят друг от друга.
2. Показатели готовности объекта функционально зависят от показателей безотказности, ремонтопригодности и восстанавливаемости объекта, а также от внешних условий, предусмотренных проектом.
3. Готовность может относиться как к функционирующему, так и к не функционирующему объекту.
4. Показателями готовности объекта являются коэффициент готовности (Опр. 52), коэффициент оперативной готовности и коэффициент технического использования.
5. См. также термин «состояние готовности» (Опр. 16).

Готовность объекта не является свойством надёжности объекта. Надёжность объекта и готовность объекта не зависят друг от друга, однако показатели готовности функционально связаны с показателями безотказности, ремонтопригодности и восстанавливаемости.

Готовность объекта зависит от обеспеченности объекта необходимыми для его работы внешними ресурсами (автомобиль при отсутствии бензина или запасного колеса переходит из состояния готовности в состояние неготовности).

Оценка показателей готовности объекта осуществляется вне зависимости от того, функционирует объект или нет, и распространяется как на эксплуатируемый объект, так и на находящийся в резерве. В этом случае характеристиками готовности служат время восстановления (среднее время восстановления), коэффициент технического использования, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности и ВБР объекта.

Опр. 8. ***Ремонтопригодность / Maintainability*** **:** Свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности путём технического обслуживания и ремонта.

Термин «ремонтопригодность» традиционно трактуют в широком смысле. Этот термин эквивалентен международному термину «maintainability». Помимо ремонтопригодности в узком смысле это понятие включает в себя «обслуживаемость», т. е. приспособленность объекта к техническому обслуживанию, «контролепригодность» и приспособленность к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, а также причин, их вызывающих. Более общие понятия «обеспеченность техническим обслуживанием», «эксплуатационная технологичность» (maintenance support, supportability) включают в себя ряд технико-экономических и организационных факторов, например качество подготовки обслуживающего персонала.

Опр. 9. ***Восстанавливаемость / Recoverability*** **:** Свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта.

Примечания:

1. Для восстановления могут требоваться или не требоваться внешние воздействия. Для случая, когда внешние воздействия не требуются, может использоваться термин «самовосстанавливаемость».
2. Восстанавливаемость не имеет непосредственного отношения к надёжности объекта.
3. Восстанавливаемость, являясь свойством объекта, не характеризует его надёжность. Объект, обладающий свойством восстанавливаемости, может иметь как высокую, так и низкую надёжность, также как и объект, не обладающий этим свойством.

Опр. 10. ***Долговечность / Durability*** **:** Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности и эффективности.

Опр. 11. ***Сохраняемость / Storability*** **:** Свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

В процессе хранения и транспортирования объекты подвергаются неблагоприятным воздействиям, например колебаниям температуры, действию влажного воздуха, вибрациям и т. п. В результате после хранения и (или) транспортирования объект может оказаться в неработоспособном и даже в предельном состоянии. Сохраняемость объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности его хранения и транспортирования.

В зависимости от условий и режимов применения объекта требования к сохраняемости устанавливают по-разному. Для некоторых классов объектов может быть установлено требование того, чтобы после хранения объект находился в таком же состоянии, что и к моменту начала хранения. В этом случае объект должен удовлетворять требованиям безотказности, долговечности и ремонтопригодности, предъявляемым к объекту на момент начала хранения. В реальных условиях происходит ухудшение параметров, характеризующих работоспособность объекта, а также снижается его остаточный ресурс. В одних случаях достаточно потребовать, чтобы после хранения и (или) транспортирования объект оставался в работоспособном состоянии. В большинстве других случаев требуется, чтобы объект сохранял достаточный запас работоспособности, т. е. обладал достаточной безотказностью после хранения и (или) транспортирования. В тех случаях, когда предусмотрена специальная подготовка объекта к применению по назначению после хранения и (или) транспортирования, требование о сохранении работоспособности заменяется требованием того, чтобы технические параметры объекта, определяющие его

безотказность и долговечность, сохранялись в заданных пределах. Все эти случаи охватывает приведённое в стандарте [15] определение понятия сохраняемости.

Требования к показателям безотказности, долговечности и ремонтопригодности для объекта, подвергнутого длительному хранению, необходимо указывать в техническом задании, и в отдельных случаях они могут быть снижены относительно уровня требований к новому объекту, не находившемуся на хранении.

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

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

3.3 Термины, относящиеся к состоянию объекта

Полный список терминов [15]: исправное состояние (исправность); неисправное состояние (неисправность); работоспособное состояние; неработоспособное состояние; состояние готовности (объекта); рабочее состояние; нерабочее состояние; предельное состояние; критерий предельного состояния; опасное состояние; техническое состояние; состояние резервирования.

Опр. 12. ***Исправное состояние (исправность) / Perfect state (flawless)*** **:** Состояние объекта, в котором все параметры объекта соответствуют всем требованиям, установленным в документации на этот объект.

Примечание: См. примечание 2 к Опр. 15.

Опр. 13. ***Неисправное состояние (неисправность) / Imperfect state (flaw)*** **:** 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 2 к Опр. 15.

Опр. 14. ***Работоспособное состояние / Up state*** **:** 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 Опр. 15.

Опр. 15. ***Неработоспособное состояние / Down state*** **:** 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 выделяют 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.

Данные понятия охватывают основные технические состояния объекта. Каждое из них характеризуется совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, а также качественных признаков, для которых не применяют количественные оценки. Номенклатуру этих параметров и признаков, а также допустимые пределы их изменений устанавливают в нормативной и технической документации.

Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Работоспособный объект может быть неисправным, например, если он не удовлетворяет эстетическим требованиям, причём ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его применению по назначению.

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

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

Переход объекта из одного состояния в другое обычно происходит вследствие повреждения или отказа. Переход объекта из исправного состояния в неисправное работоспособное состояние происходит из-за повреждений.

В работоспособном состоянии различают «рабочее состояние» (operating state) и «нерабочее состояние» (non-operating state), при котором объект не функционирует (см. Опр. 17 и 18).

В отраслевой документации допускается использование более детальной классификации состояний, не противоречащей приведённой в ГОСТ Р 27.102-2021 [15].

Опр. 16. ***Состояние готовности (объекта) / Availability status (of item)*** **:** 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.

Состояние готовности объекта относится только к объекту и не характеризует состояние выполнения задания.

В состоянии готовности объект должен быть обеспечен внешними ресурсами, необходимыми для его работы. Например, при отсутствии бензина или запасного колеса автомобиль не может работать и, следовательно, не находится в состоянии готовности.

Термины «состояние готовности» и «готовность объекта» не являются синонимами.

Опр. 17. ***Рабочее состояние / Operating state*** **:** Состояние объекта, в котором он выполняет хотя бы одну требуемую функцию.

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

Опр. 18. ***Нерабочее состояние / Non-operating state*** **:** Состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций.

Примечание: Неработающий объект может находиться в любом из состояний, приведённых в Опр. 12 – 15.

«Нерабочее состояние» допускается подразделять, в свою очередь, на состояние резервирования (standby state) и состояние планового простоя (idle, free state). Кроме того, различают:

- «внутреннее неработоспособное состояние» (internal disabled state), эквивалентное неработоспособному состоянию в соответствии с Опр. 15;
- «внешнее неработоспособное состояние» (external disabled state), обусловленное отсутствием внешних ресурсов.

Опр. 19. ***Предельное состояние / Limiting state*** **:** Состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Примечание: Недопустимость дальнейшей эксплуатации устанавливают на основе критериев предельного состояния объекта.

Переход объекта в предельное состояние влечёт за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации объекта. При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, утилизирован или передан для применения не по

назначению. Если критерий предельного состояния установлен из соображений безопасности, хранения и (или) транспортирования объекта, то при наступлении предельного состояния хранение и (или) транспортирование объекта должно быть прекращено. В других случаях при наступлении предельного состояния должно быть прекращено применение объекта по назначению.

Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух видов. Первый вид совпадает с неработоспособным состоянием. Второй вид предельного состояния обусловлен тем обстоятельством, что начиная с некоторого момента дальнейшая эксплуатация ещё работоспособного объекта оказывается недопустимой в связи с опасностью или высокими затратами эксплуатации. Переход неремонтируемого объекта в предельное состояние второго вида происходит до потери объектом работоспособности.

Для ремонтируемых объектов выделяют два или более видов предельных состояний. Например, для двух видов предельных состояний требуется отправка объекта в средний или капитальный ремонт, т. е. временное прекращение применения объекта по назначению. Третий вид предельного состояния предполагает окончательное прекращение применения объекта по назначению. Критерии предельного состояния каждого вида устанавливают в документации.

Опр. 20. ***Техническое состояние / Technical condition*** **:** Состояние объекта в определённый момент времени, при определённых условиях внешней среды, характеризующееся фактическими значениями параметров, установленных в документации.

Опр. 21. ***Состояние резервирования / Standby state*** **:** Нерабочее состояние работоспособного объекта, находящегося в резерве, в течение заданного периода времени.

Примечание: В некоторых случаях объект, находящийся в резерве, может подвергаться воздействию рабочих параметров резервируемого объекта.

Допускается выделять также «состояние горячего резерва», когда резервный объект готов к работе сразу после запроса, и «состояние холодного резерва», когда для начала работы резервному объекту требуется после запроса некоторая подготовка.

3.4 Термины, относящиеся к временным понятиям

Полный список терминов [15]: наработка; наработка до отказа; наработка между отказами; ресурс; остаточный ресурс; срок службы; срок сохраняемости; время (продолжительность) ремонта; время восстановления; назначенный ресурс; назначенный срок службы; назначенный срок хранения.

Опр. 22. ***Наработка / Operating time*** **:** Продолжительность или объём работы объекта.

Примечание: Наработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), так и дискретной величиной (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

Опр. 23. ***Наработка до отказа / Operating time to failure*** **:** Наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа.

Примечание: Частным случаем наработки до отказа является наработка до первого отказа — наработка объекта от начала его эксплуатации до первого отказа.

Опр. 24. ***Ресурс / Operating life*** **:** Суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до момента достижения объектом предельного состояния.

Опр. 25. ***Остаточный ресурс / Residual operating life*** **:** Суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения объектом предельного состояния.

Опр. 26. ***Назначенный ресурс / Assigned operating life*** **:** Суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Примечания:

1. Данный показатель не является показателем надёжности.
2. По истечении назначенного ресурса объекта должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей документацией, о ремонте, списании, утилизации, оценке технического состояния, установлении нового назначенного ресурса и т. п.

3.5 Термины, относящиеся к отказам, дефектам, повреждениям

Полный список терминов [15]: отказ; дефект; повреждение; вид отказа; критерий отказа; независимый отказ; зависимый отказ; причина отказа; последствия отказа; критичность отказа; ресурсный отказ; внезапный отказ; постепенный отказ; систематический отказ; перемежающийся отказ; сбой; явный отказ; скрытый отказ; конструктивный отказ; производственный отказ; эксплуатационный отказ; деградационный отказ; механизм отказа; отказы по общей причине; отказы общего вида.

Опр. 27. ***Отказ / Failure*** **:** Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Примечания:

1. Отказ может быть полным или частичным.
2. Полный отказ характеризуется переходом объекта в неработоспособное состояние.
3. Частичный отказ характеризуется переходом объекта в частично неработоспособное состояние.

Если работоспособность объекта характеризуется совокупностью значений некоторых технических параметров, то признаком возникновения отказа является

выход значений любого из этих параметров за пределы допусков. Кроме того, в критерии отказов могут входить также качественные признаки, указывающие на нарушение нормальной работы объекта.

Опр. 28. ***Дефект / Defect*** **:** Каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным в документации.

Опр. 29. ***Повреждение / Damage*** **:** Нарушение исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния.

Примечания:

1. Дефект и (или) повреждение могут служить причиной возникновения частичного или полного отказа объекта.
2. Наличие дефекта и (или) повреждения приводит объект в неисправное состояние.

Критерии отказов следует отличать от критериев повреждений. Под критериями повреждений понимают признаки или совокупность признаков неисправного, но работоспособного состояния объекта.

Опр. 30. ***Вид отказа / Failure mode*** **:** Единица классификации отказов на основе установленных критериев: особенностей, причины, последствий отказа; функции, способность выполнения которой утрачена в результате отказа; или изменения состояния объекта.

Опр. 31. ***Причина отказа / Failure cause*** **:** Явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта.

Примечания:

1. Причины отказа могут быть как внутри объекта (внутренние причины), так и вне его (внешние причины).
2. Причиной отказа могут быть только внешние причины, предусмотренные проектом объекта. Внешние факторы, не предусмотренные проектом объекта, а также административные, логистические, организационные в качестве причины отказа не учитывают.

Опр. 32. ***Последствия отказа / Failure effect*** **:** Явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.

Примечания:

1. В некоторых случаях при анализе может быть необходимо рассмотреть отдельные виды отказов и их последствия.
2. Последствия отказа могут быть как внутри объекта, так и вне его.

Опр. 33. ***Критичность отказа / Criticality of a failure*** **:** Совокупность признаков, характеризующих значимость последствий отказа.

Примечание: Классификацию отказов по критичности (критический/некритический), например по уровню прямых и косвенных потерь, связанных с возникновением отказа, или по трудоёмкости устранения

последствий отказа, устанавливают в документации на основании технического и экономического анализа.

Опр. 34. ***Сбой / Interruption*** **:** Самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

Отличительным признаком сбоя является то, что восстановление работоспособного состояния объекта может быть обеспечено без ремонта, например путём воздействия оператора на органы управления, устранением обрыва нити, магнитной ленты и т. п., коррекцией положения заготовки.

Характерным примером является сбой при выполнении компьютерной программы, устраняемый повторным пуском программы с места останова или её перезапуском сначала.

3.6 Термины, относящиеся к техническому обслуживанию, восстановлению и ремонту

Полный список терминов [15]: система технического обслуживания и ремонта; техническое обслуживание (ТО); обслуживаемый объект; необслуживаемый объект; восстановление; самовосстановление; восстанавливаемый объект; невосстанавливаемый объект; ремонт; ремонтопригодный объект; неремонтопригодный объект; мониторинг технического состояния; замена; запасная часть; запасные части, инструменты и принадлежности (ЗИП); комплект ЗИП; система ЗИП.

3.7 Термины, относящиеся к показателям надёжности

Полный список терминов [15]: показатель надёжности; единичный показатель надёжности; комплексный показатель надёжности; расчётная оценка показателя надёжности; экспериментальная оценка показателя надёжности; эксплуатационная оценка показателя надёжности; экстраполированная оценка показателя надёжности.

Опр. 35. ***Показатель надёжности / Dependability measure*** **:** Количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надёжность объекта.

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

Применение статистической теории надёжности к уникальным и мелкосерийным объектам ограничено. Эта теория применима для единичных

восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов, в которых в соответствии с нормативной и технической документацией допустимы многократные отказы, для описания последовательности которых применима модель потока случайных событий. Теорию применяют также к уникальным и мелкосерийным объектам, которые в свою очередь состоят из объектов массового производства. В этом случае расчёт показателей надёжности объекта в целом проводят методами статистической теории надёжности по известным показателям надёжности составных частей и элементов.

Методы статистической теории надёжности позволяют установить требования к надёжности составных частей и элементов на основании требований к надёжности объекта в целом.

Статистическая теория надёжности является составной частью более общего подхода к расчётной оценке надёжности технических объектов, при котором отказы рассматривают как результат взаимодействия объекта как физической системы с другими объектами и окружающей средой. Так, при проектировании строительных сооружений и конструкций учитывают в явной или неявной форме статистический разброс механических свойств материалов, элементов и соединений, а также изменчивость (во времени и в пространстве) параметров, характеризующих внешние нагрузки и воздействия. Большая часть показателей надёжности полностью сохраняет смысл и при более общем подходе к расчётной оценке надёжности. В простейшей модели расчёта на прочность по схеме «параметр нагрузки — параметр прочности» вероятность безотказной работы совпадает с вероятностью того, что в пределах заданного отрезка времени значение параметра нагрузки ни разу не превысит значения параметра прочности. При этом оба параметра могут быть случайными функциями времени.

На стадии проектирования и конструирования показатели надёжности трактуют как характеристики вероятностных или частично вероятностных математических моделей создаваемых объектов. На стадиях экспериментальной отработки, испытаний и эксплуатации используют статистические оценки соответствующих вероятностных характеристик.

В целях единообразия все показатели надёжности, перечисленные в ГОСТ Р 27.102-2021 [15], определены как вероятностные характеристики. Это подчёркивает также возможность прогнозирования значения этих показателей на стадии проектирования.

Показатели надёжности вводят по отношению к определённым режимам и условиям эксплуатации, установленным в документации.

Опр. 36. ***Единичный показатель надёжности / Simple dependability measure*** **:** Показатель надёжности, характеризующий одно из свойств, составляющих надёжность объекта.

Примечание: Единичными показателями надёжности являются показатели безотказности, ремонтопригодности, восстанавливаемости, долговечности, сохраняемости.

Опр. 37. ***Комплексный показатель надёжности / Integrated depend-***

ability measure **:** Показатель надёжности, характеризующий несколько свойств, составляющих надёжность объекта.

В отличие от единичного показателя надёжности комплексный показатель надёжности количественно характеризует не менее двух свойств, составляющих надёжность, например безотказность и ремонтопригодность. Примером комплексного показателя надёжности служит коэффициент готовности (см. Опр. 52).

Опр. 38. ***Расчётная оценка показателя надёжности / Calculated estimation of the dependability measure*** **:** Точечная или интервальная оценка показателя надёжности, определяемая расчётным методом.

Опр. 39. ***Экспериментальная оценка показателя надёжности / Experimental estimation of the dependability measure*** **:** Точечная или интервальная оценка показателя надёжности, определяемая по данным испытаний.

Опр. 40. ***Эксплуатационная оценка показателя надёжности / Field estimation of the dependability measure*** **:** Точечная или интервальная оценка показателя надёжности, определяемая по данным эксплуатации.

Опр. 41. ***Экстраполированная оценка показателя надёжности / The extrapolated estimation of the dependability measure*** **:** Точечная или интервальная оценка показателя надёжности, определяемая на основании результатов расчётов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путём экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

Классификация оценок показателей надёжности с помощью Опр. 38–41 основана на способе их определения. Наличие этих понятий должно предупреждать путаницу, которая может возникнуть на практике при анализе и обработке числовых данных, полученных разными способами и на разных стадиях жизненного цикла объекта.

3.8 Термины, относящиеся к показателям безотказности

Полный список терминов [15]: вероятность безотказной работы; средняя наработка до отказа; гамма-процентная наработка до отказа; средняя наработка между отказами; гамма-процентная наработка между отказами; (мгновенная) интенсивность отказов; средняя интенсивность отказов; (мгновенный) параметр потока отказов; средний параметр потока отказов; стационарный параметр потока отказов.

Опр. 42. ***Вероятность безотказной работы / Reliability function*** **:** Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Опр. 43. ***Средняя наработка до отказа / Mean operating time to failure*** **:** Математическое ожидание наработки объекта до отказа.

Опр. 44. ***Гамма-процентная наработка до отказа / Gamma-percentile operating time to failure*** **:** Наработка до отказа, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ, выраженной в процентах.

Опр. 45. ***Средняя наработка между отказами / Mean operating time between failures*** **:** Математическое ожидание наработки объекта между отказами.

Примечание: В случае, когда наработка между отказами подчиняется экспоненциальному распределению, её называют средней наработкой на отказ и определяют как отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию количества его отказов в течение этой наработки.

Опр. 46. ***Гамма-процентная наработка между отказами / Gamma-percentile operating time between failure*** **:** Наработка между отказами, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ, выраженной в процентах.

Опр. 47. ***(мгновенная) Интенсивность отказов / Failure rate*** **:** Условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Опр. 48. ***Средняя интенсивность отказов / Mean failure rate*** **:** Математическое ожидание мгновенной интенсивности отказов за заданный период времени.

Опр. 49. ***(мгновенный) Параметр потока отказов / Failure intensity*** **:** Предел отношения вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта за достаточно малый интервал времени к продолжительности этого интервала, стремящейся к нулю.

Опр. 50. ***Средний параметр потока отказов / Mean failure intensity*** **:** Математическое ожидание мгновенного параметра потока отказов за заданный период времени.

Опр. 51. ***Стационарный параметр потока отказов / Stationary failure intensity*** **:** Предел мгновенного параметра потока отказов при стремлении рассматриваемого момента времени к бесконечности.

3.9 Термины, относящиеся к показателям долговечности

Полный список терминов [15]: средний ресурс; гамма-процентный ресурс; средний срок службы; гамма-процентный срок службы.

3.10 Термины, относящиеся к показателям ремонтопригодности и восстанавливаемости

Полный список терминов [15]: вероятность восстановления; среднее время восстановления; гамма-процентное время восстановления; интенсивность восстановления; средняя трудоёмкость восстановления.

3.11 Термины, относящиеся к показателям сохраняемости

Полный список терминов [15]: средний срок сохраняемости; гамма-процентный срок сохраняемости.

3.12 Термины, относящиеся к комплексным показателям надёжности

Полный список терминов [15]: (мгновенный) коэффициент готовности; (мгновенный) коэффициент неготовности; коэффициент оперативной готовности; коэффициент технического использования; коэффициент сохранения эффективности.

Опр. 52. ***(мгновенный) Коэффициент готовности / (instantaneous) Availability factor*** **:** Вероятность того, что в данный момент времени объект находится в работоспособном состоянии, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Примечание: В некоторых случаях выделяют проектный коэффициент готовности, определяемый при проектировании для идеальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, и коэффициент эксплуатационной готовности, определяемый для реальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. Отношение эксплуатационного коэффициента готовности к проектному характеризует использование объекта по его назначению.

Опр. 53. ***(мгновенный) Коэффициент неготовности / (instantaneous) Unavailability factor*** **:** Вероятность того, что объект в данный момент времени находится в неработоспособном состоянии, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Примечание: В некоторых случаях выделяют проектный коэффициент неготовности, определяемый при проектировании для идеальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, и коэффициент эксплуатационной неготовности, определяемый для реальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. Отношение эксплуатационного коэффициента неготовности к проектному характеризует использование объекта по его назначению.

Опр. 54. ***Коэффициент оперативной готовности / Operational availability factor*** **:** Вероятность того, что объект окажется в работоспособном

состоянии в данный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного периода времени.

Опр. 55. ***Коэффициент технического использования / Total availability factor, utilization factor*** **:** Отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Опр. 56. ***Коэффициент сохранения эффективности / Efficiency ratio*** **:** Отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определённую продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

Примечание: Для каждого типа объектов понятия эффективности и показателя эффективности устанавливают в документации на объект.

3.13 Термины, относящиеся к разработке, обеспечению и анализу надёжности

Полный список терминов [15]: нормирование надёжности (объекта); нормируемый показатель надёжности; программа обеспечения надёжности; оценка надёжности; прогнозирование надёжности; расчётный метод оценки надёжности; расчётно-экспериментальный метод оценки надёжности; экспериментальный метод оценки надёжности; анализ отказов; отбраковочные испытания.

Опр. 57. ***Нормирование надёжности (объекта) / Dependability specification (of item)*** **:** Установление в нормативной и технической документации количественных и качественных требований к надёжности объекта.

Примечание: Нормирование надёжности включает выбор номенклатуры нормируемых показателей надёжности; установление и технико-экономическое обоснование значений показателей надёжности объекта и его составных частей; задание требований к точности и достоверности исходных данных; установление критериев отказов, повреждений и предельных состояний; задание требований к методам контроля надёжности на всех этапах жизненного цикла объекта.

Опр. 58. ***Нормируемый показатель надёжности / Specified dependability measure*** **:** Показатель надёжности, значение которого регламентировано нормативной и технической документацией на объект.

Опр. 59. ***Программа обеспечения надёжности / dependability support program*** **:** Документ, устанавливающий перечень и порядок проведения на разных стадиях жизненного цикла объекта организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение надёжности и (или) на её повышение.

Опр. 60. ***Оценка надёжности / Dependability assessment*** **:** Определение точечных и интервальных оценок показателей надёжности объекта.

Опр. 61. ***Прогнозирование надёжности / Prediction of dependability*** **:** Определение оценки показателя надёжности объекта на основании предшествующего опыта или путём экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

Опр. 62. ***Расчётный метод оценки надёжности / Calculated method of dependability assessment*** **:** Метод, основанный на вычислении оценок показателей надёжности по справочным данным о надёжности компонентов и комплектующих элементов объекта, по данным о надёжности объектов — аналогов, по данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчёта.

Опр. 63. ***Расчётно-экспериментальный метод оценки надёжности / Calculated-experimental method of dependability assessment*** **:** Метод оценки надёжности объекта путём расчёта, при котором оценки показателей надёжности всех или некоторых составных частей объекта определены экспериментально.

Опр. 64. ***Экспериментальный метод оценки надёжности / Experimental method of dependability assessment*** **:** Метод оценки показателей надёжности путём статистической обработки данных, полученных при испытаниях или эксплуатации объекта в целом.

Опр. 65. ***Анализ отказов / Failure analysis*** **:** Исследование отказов, направленное на определение факторов, влияющих на надёжность (причин отказов, составляющих времени восстановления, эффективности резервирования и т. п.).

Опр. 66. ***Отбраковочные испытания / Screening test*** **:** Испытание или набор испытаний, предназначенные для обнаружения и удаления из выборки дефектных объектов или объектов с высокой вероятностью ранних отказов.

Примечание: Отбраковочные испытания улучшают показатели надёжности выборки, но не всей совокупности объектов.

3.14 Термины, относящиеся к резервированию

Полный список терминов [15]: резервирование; резерв; основной элемент; резервируемый элемент; резервный элемент; кратность резерва; нагруженный резерв; облегчённый резерв; ненагруженный резерв; постоянное резервирование; резервирование замещением; общее резервирование; переключающий элемент; вероятность успешного перехода на резерв; смешанное резервирование; резервирование без восстановления; резервирование с восстановлением; мажоритарное резервирование.

3.15 Термины, относящиеся к испытаниям на надёжность

Полный список терминов [15]: испытания на надёжность; определительные испытания на надёжность; контрольные испытания на надёжность; лабораторные испытания на надёжность; эксплуатационные испытания на надёжность; нормальные испытания; ускоренные испытания; коэффициент ускорения испытаний; план испытаний на надёжность.

4 Классификация объектов по надёжности

Из приведённого выше обзора терминов очевидно, что технические системы вообще (и информационные, в частности) с точки зрения их надёжности можно классифицировать используя различные критерии. В частности, можно классифицировать объекты по характеру последствий к которым могут приводить возникающие в них отказы (см. Опр. 32, 33 и примеры в таблице 1).

4.1 Критичность отказов и их последствия

Понятие критичности отказа (Опр. 33) введено для того, чтобы можно было проводить классификацию отказов по значимости их последствий. Критерием классификации при этом могут служить прямые и косвенные потери, вызванные отказами, затраты труда и времени на устранение последствий отказов, возможность и целесообразность ремонта силами потребителя или необходимость ремонта изготовителем или третьей стороной, продолжительность простоев из-за возникновения отказов, степень снижения производительности при отказе, приводящем к частично неработоспособному состоянию, и т. п. Классификацию отказов по их последствиям устанавливают в документации по согласованию между заказчиком и разработчиком (изготовителем). Для простых объектов эту классификацию не используют.

При классификации отказов по значимости последствий могут быть введены две, три и большее количество категорий отказов. Различают критические (critical) и некритические (noncritical) отказы. Последние подразделяют на существенные (major) и несущественные (minor) отказы. Критичность последствий отказа может сопровождаться оценкой допускаемой вероятности безотказной работы (ВБР). В этом случае безотказность определяется по наиболее ответственным элементам и подсистемам объекта.

Например, в пассажирском самолёте может отказать шасси, может снизиться коэффициент полезного действия двигателя, может сломаться пассажирское кресло. В первом случае последствия могут быть катастрофическими, во втором возможен экономический ущерб, в третьем — серьёзных последствий практически не будет и, хотя в каждом из этих случаев допустимая вероятность безотказной работы должна быть разной, в целом самолёт по последствиям отказов должен быть отнесён к классу объектов с критическими последствиями отказов.

Надо понимать, что границы между категориями отказов при этом

Таблица 1: Примеры последствий отказов

Критичность и последствия отказов	**Допустимая ВБР**	**Примеры**
Некритические: Ремонтные затраты в пределах нормы.	$P(t) < 0.9$	Отдельные узлы и элементы оборудования.
Экономический ущерб: Повышенные простои, работа на пониженных режимах или с ухудшенными показателями.	$P(t) > 0.9$ или $P(t) > 0.99$	Технологическое оборудование, сельскохозяйственные и бытовые машины.
Катастрофические: Аварии, катастрофы, невыполнение ответственного задания.	$P(t) \to 1$	Летательные аппараты, военная техника, химическое и медицинское оборудование.

достаточно условны. Так, отказ одного и того же объекта может трактоваться как критический, существенный или несущественный, в зависимости оттого, рассматривают ли объект индивидуально или он является составной частью другого объекта. Несущественный отказ объекта, входящего в состав более ответственного объекта, может быть существенным и даже критическим в зависимости от последствий отказа сложного объекта. Для проведения классификации отказов по значимости последствий необходимо проведение анализа критериев, причин и последствий отказов и построение логической и функциональной связи между отказами.

Классификация отказов по значимости последствий необходима при нормировании надёжности (в частности, для обоснованного выбора номенклатуры и численных значений нормируемых показателей надёжности), а также при установлении гарантийных обязательств.

4.2 Классификация отказов

Согласно ГОСТ Р 27.102-2021 [15] отказы можно классифицировать не только по их критичности и характеру возникающих при этом последствий, но и с помощью множества других критериев, регламентируемых следующими терминами.

Опр. 67. ***Независимый отказ / Primary failure*** **:** Отказ, не вызванный возникновением других отказов.

Опр. 68. ***Зависимый отказ / Secondary failure*** **:** Отказ, вызванный возникновением других отказов.

Опр. 69. ***Ресурсный отказ / Marginal failure*** **:** Отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

Опр. 70. ***Внезапный отказ / Sudden failure*** **:** Отказ, характеризующийся

скачкообразным переходом объекта из работоспособного состояния в неработоспособное состояние.

Опр. 71. ***Постепенный отказ / Gradual failure*** **:** Отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта.

Причинами постепенных отказом могут быть износ, старение материалов и т. п.

Термины «внезапный отказ» и «постепенный отказ» позволяют разделять отказы на две категории в зависимости от возможности прогнозирования момента возникновения отказа. В отличие от внезапного отказа появлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удаётся предупредить появление отказа или принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий.

Тем не менее, чёткую границу между внезапными и постепенными отказами провести невозможно. Механические, физические и химические процессы, которые составляют причины отказов, как правило, протекают во времени достаточно медленно. Так, усталостная трещина в стенке трубопровода или сосуда давления, зародившаяся из дефекта, медленно растёт в процессе эксплуатации; этот рост в принципе может быть прослежен средствами неразрушающего контроля. Однако собственно отказ (наступление течи) происходит внезапно. Если по каким-либо причинам своевременное обнаружение несквозной трещины оказалось невозможным, то отказ придётся признать внезапным.

Опр. 72. ***Систематический отказ / Systematic failure*** **:** Отказ, однозначно вызванный определённой причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, правил эксплуатации и документации.

Примечания:

1. Систематический отказ может быть воспроизведён путём преднамеренного создания условий, вызывающих отказ, например с целью определения причины отказа.
2. Систематический отказ является результатом систематической неисправности.

Опр. 73. ***Перемежающийся отказ / Intermittent failure*** **:** Многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

Примечание: В технической документации должен быть установлен критерий понятия “многократно возникающий отказ”.

Опр. 74. ***Явный отказ / Explicit failure*** **:** Отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения.

Опр. 75. ***Скрытый отказ / Latent failure*** **:** Отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования,

но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования.

Опр. 76. ***Конструктивный отказ / Design failure*** **:** Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством конструкции или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования.

Опр. 77. ***Производственный отказ / Manufacturing failure*** **:** Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления объекта или его ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.

Опр. 78. ***Эксплуатационный отказ / Misuse failure*** **:** Отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации объекта.

Классификация отказов по причинам возникновения (Опр. 76 – 78) введена с целью установления, на какой стадии создания или существования объекта следует провести мероприятия для устранения причин отказов.

Допускается выделять отказы покупных комплектующих изделий. Отказы составных частей также могут быть конструктивными, производственными и эксплуатационными. Классификация не является исчерпывающей, поскольку возможно возникновение отказов, вызванных двумя или тремя причинами.

Опр. 79. ***Деградационный отказ / Wear-out failure*** **:** Отказ, обусловленный естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации объекта.

При анализе надёжности объекта различают ранние отказы, когда проявляется влияние дефектов, не обнаруженных в процессе изготовления, испытаний и (или) приёмочного контроля, и поздние, деградационные отказы. Последние происходят на заключительной стадии эксплуатации объекта, когда вследствие естественных процессов старения, изнашивания, коррозии и т. п. объект или его составные части приближаются к предельному состоянию по условиям физического износа. В соответствии с определением деградационный отказ может иметь место только при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации объекта. Возникновение деградационных отказов всегда происходит за пределами планируемого полного или межремонтного срока службы (ресурса). Возможность продолжения эксплуатации по истечении планового срока службы (ресурса), с учётом возможности появления деградационных отказов, обеспечивается расчётом на долговечность с учётом физики процессов, приводящих к деградационным отказам, а также надлежащей системы технического обслуживания и ремонта. Можно практически исключить возникновение ранних отказов, если до передачи объекта в эксплуатацию провести приработку, обкатку,

технологический прогон и т. п. При этом соответственно может измениться цена объекта.

Опр. 80. ***Механизм отказа / Failure mechanism*** **:** Процесс, приводящий к отказу объекта.

Примечание: Процесс может быть физическим, химическим, биологическим, логическим или их сочетанием.

Опр. 81. ***Отказы по общей причине / Common cause failures*** **:** Отказы различных объектов, возникающие вследствие одного события (отказа, ошибки персонала, внешнего или внутреннего воздействия), которые без рассмотрения причин считались бы независимыми.

Примечание: Отказы по общей причине могут быть также отказами общего вида.

Опр. 82. ***Отказы общего вида / Common mode failures*** **:** Отказы различных объектов, характеризующиеся одним и тем же видом отказа.

Примечания:

1. У отказов общего вида могут быть различные причины.
2. Отказы общего вида могут быть также отказами по общей причине.

Классификация отказов, специфических именно для ИС, может включать:

- **Аппаратный отказ** — событие, при котором изделие утрачивает работоспособность, и для его восстановления требуется проведение ремонта аппаратуры или полная замена объекта.

- **Программный отказ** – событие, при котором объект утрачивает работоспособность по причине несовершенства программы. Устраняется путём исправления программы.

5 Способы обеспечения надёжности ИС

Надёжность ИС может рассматриваться только на основе совокупности качеств надёжности как её аппаратного, так и программного обеспечения.

Вообще в технике надёжность достигается на трёх основных этапах:

1. разработки,

2. производства,

3. эксплуатации.

Для чисто программных средств в контексте надёжности рассматриваются только этапы разработки и эксплуатации. Повышение надёжности программных средств, включает (но не ограничивается ими) следующие направлениями.

1. Корректная постановка технического задания (конкретная задача на разработку ПО);

2. Использование прогрессивных технологий программирования;
3. Контроль правильности функционирования (тестирование, отладка, анализ и обработка отчётов об ошибках пользователей в процессе экспуатации).

5.1 Отказоустойчивые ИС

Подходы к созданию отказоустойчивых систем включают:

1. резервирование,
2. помехоустойчивое кодирование информации,
3. создание адаптивных систем.

5.2 Блокировка ошибочных операций

Способы блокировки:

1. Чисто технические средства.
2. Комплексные программно-аппаратные средства.

5.3 Оптимизация взаимодействия с ИС

Сокращение числа ошибок пользователей и обслуживающего персонала является одним из основных направлений защиты информации в ИС от непреднамеренных угроз. Эта деятельность опирается на следующие принципы.

1. Научная организация труда. В том числе:
   - эргономичное оборудование рабочих мест;
   - оптимальный режим труда и отдыха;
   - дружественный интерфейс взаимодействия человека с ИС.
2. Обучение персонала и пользователей.
3. Анализ имеющихся процессов взаимодействия человека с ИС и их совершенствование.

6 Основные количественные показатели надёжности

6.1 Вероятность безотказной работы (ВБР)

Вероятность безотказной работы (Опр. 42) определяют в предположении, что в начальный момент времени объект находился в работоспособном состоянии.

Обозначим через t время или суммарную наработку объекта (далее — просто наработка). Возникновение первого отказа — случайное событие, а наработка τ от начального момента до возникновения этого события — случайная величина. Вероятность безотказной работы $P(t)$ объекта в интервале от 0 до t включительно имеет вид:

$$P(t) = \mathbb{P}\{\tau > t\}. \tag{1}$$

Здесь $\mathbb{P}\{A\}$ — вероятность события A.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ является функцией наработки t. Обычно эту функцию предполагают непрерывной и дифференцируемой. Кроме того, предполагают, что ВБР обладает следующими свойствами:

1. $P(0) = 1$, т. е. до начала работы объект безусловно работоспособен;
2. $\lim\limits_{t\to\infty} P(t) = 0$ — работоспособность объекта не может сохраняться неограниченно долго;
3. $\dfrac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t} \leqslant 0$ — после отказа работоспособность объекта не может восстанавливаться спонтанно.

Если способность объекта выполнять заданные функции характеризуется одним параметром ν, то вместо формулы (1) можно записать:

$$P(t) = \mathbb{P}\{\nu_{\min}(t_1) \leqslant \nu(t_1) \leqslant \nu_{\max}(t_1); 0 \leqslant t_1 \leqslant t\}, \tag{2}$$

где $\nu_{\min}$ и $\nu_{\max}$ — предельные по условиям работоспособности значения параметров (в (2) явно выражено, что эти значения могут изменяться во времени).

По аналогии (2) вводят ВБР в более общем случае, когда состояние объекта характеризуется набором параметров $\{\nu_i\}$ с допустимой по условиям областью значений этих параметров.

Формулы (1) и (2) относятся к объектам, которые должны функционировать в течение некоторого конечного отрезка времени. Для объектов одноразового (дискретного) применения вероятность безотказной работы определяют как вероятность того, что при срабатывании объекта отказ не возникает. Аналогично вводят вероятность безотказного включения (например, в рабочий режим из режима ожидания).

ВБР является наиболее часто применяемым параметром надёжности. Это объясняется следующими особенностями $P(t)$:

- входит в качестве сомножителя в другие, более общие характеристики системы, например, в эффективность и стоимость;
- характеризует изменение надёжности с наработкой;
- может быть получена расчётным путём в процессе проектирования системы и оценена в процессе её испытания.

6.2 Плотность распределения наработки до отказа

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

$$Q(t) = 1 - P(t). \tag{3}$$

Плотность распределения $f(t)$ наработки до отказа по определению связана с ВБР $P(t)$ и вероятностью отказа $Q(t)$ следующим образом:

$$f(t) = -\frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}Q(t)}{\mathrm{d}t}. \tag{4}$$

Математически, смысл заложенный в (4) состоит в том, что $f(t)$ — это изменение вероятности отказов в течение наработки объекта. Другими словами, плотность распределения $f(t)$ — это частота отказов (чем быстрее с течением наработки убывает ВБР, тем чаще происходят отказы). Знак «$-$» в первом равенстве (4) обусловлен тем, что ВБР $P(t)$ по смыслу есть убывающая функция, а плотность распределения — это положительно-определённая величина.

Согласно математической статистике любая плотность распределения $f(t)$ случайной величины связана с её функцией распределения $F(t)$ следующим образом:

$$F(t) = \int_0^t f(t_1)\,\mathrm{d}t_1. \tag{5}$$

Подставляя в определение (5) плотность распределения (4) и выполняя преобразования, получим

$$F(t) = -\int_0^t \frac{\mathrm{d}P(t_1)}{\mathrm{d}t_1}\,\mathrm{d}t_1 = -\int_0^t \mathrm{d}P(t_1) = \int_t^0 \mathrm{d}P(t_1) = P(0) - P(t). \tag{6}$$

Теперь, учитывая, что по определению ВБР (Опр. 42) справедливо предположение об изначальной работоспособности объекта $P(0) = 1$, окончательно связываем функцию распределения наработки на отказ с ВБР:

$$F(t) = 1 - P(t). \tag{7}$$

Сравнивая (7) с (3), приходим к выводу о том, что функция распределения наработки на отказ $F(t)$ совпадает с вероятностью отказа $Q(t)$

$$F(t) = Q(t). \tag{8}$$

Точечные оценки ВБР $\widehat{P}(t)$ и функции распределения наработки до отказа $\widehat{F}(t)$ на интервале от 0 до t дают формулы:

$$\widehat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad \widehat{F}(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \tag{9}$$

где N_0 — количество объектов, работоспособных в начальный момент времени, а $n(t)$ — количество объектов, отказавших на отрезке от 0 до t. Для получения достоверных оценок объём выборки N_0 должен быть достаточно велик.

Статистическую оценку для определения частоты отказов на интервале наработки от t до $t + \Delta t$ можно получить следующим образом:

$$\widehat{f}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t)\Delta t}, \tag{10}$$

где $n(\Delta t)$ — число объектов, отказавших на рассматриваемом интервале наработки, $N(t)$ — число работоспособных объектов в начале испытания.

6.3 Интенсивность отказов

Интенсивностью отказов (Опр. 47) $\lambda(t)$ называют условную плотность вероятности возникновения отказа. Под условностью здесь подразумевается, что вероятность отказа оценивается при обязательном требовании, а именно — к данному моменту объект ещё не вышел из строя, т. е. проработал безотказно в течение наработки t. Эта величина выражает интенсивность процессов возникновения отказов, а её вероятностная оценка определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \tag{11}$$

Из определения (11) видно, что интенсивность отказов $\lambda(t)$ измеряется в единицах обратных единицам наработки t

$$[\lambda] = \left[t^{-1}\right].$$

Если наработка определяется *временем* безотказной работы, то интенсивность отказов λ можно оценивать например в 1/ч, однако на практике это не очень удобно. Поэтому современным отраслевым стандартом измерения интенсивности отказов электронных компонентов является FIT (Failures In Time) — 1 отказ на 1 миллиард часов суммарной наработки устройства:

$$1 \text{ FIT} = 10^{-9} \text{ 1/ч}. \tag{12}$$

Пример: интенсивность отказов современных enterprise NVMe SSD (например, PCIe Gen5) составляет порядка $10 \div 50$ FIT, а серверных CPU — около $20 \div 100$ FIT на кристалл.

Статистическая оценка интенсивности отказов $\widehat{\lambda}(t)$ имеет вид

$$\widehat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N_{\text{ср}}\Delta t}, \quad N_{\text{ср}} = \frac{N(t) + N(t + \Delta t)}{2}. \tag{13}$$

Для высоконадёжных систем $P(t) \approx 1$ (это приближённое равенство на практике можно считать справедливым, когда $P(t) \geqslant 0.99$), так что

интенсивность отказов приближённо равна плотности распределения наработки до отказа $\lambda(t) \approx f(t)$.

Легко установить связь между интенсивностью отказов $\lambda(t)$ и ВБР $P(t)$. Для этого достаточно подставить в определение (11) выражение для частоты отказов (4) и выполнить следующие преобразования:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)}\frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}\ln P(t)}{\mathrm{d}t} \quad \Longrightarrow \quad \mathrm{d}\ln P(t) = -\lambda(t)\,\mathrm{d}t.$$

Отсюда, выполняя интегрирование на интервале от 0 до t (с учётом того, что $\ln P(0) = \ln 1 = 0$) и потенцирование, окончательно получаем

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t_1)\,\mathrm{d}t_1\right]. \tag{14}$$

Опыт эксплуатации ИС показывает, что интенсивность отказов $\lambda(t)$ в течение наработки t изменяется как показано на рис. 1. Как видно, зависимость $\lambda(t)$ можно разделить на три участка.

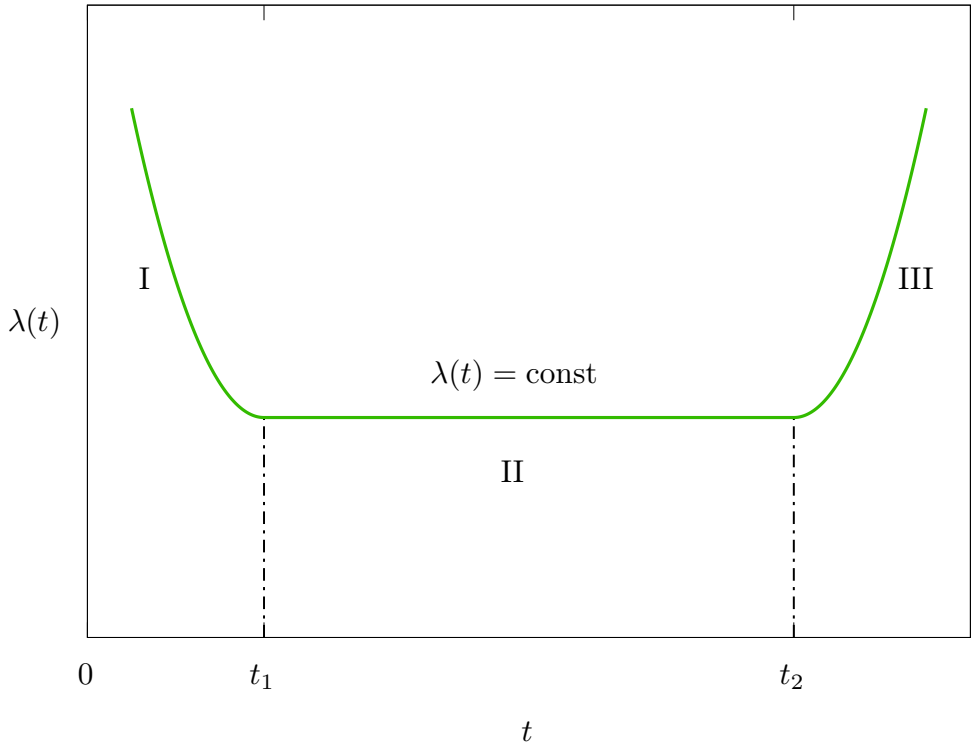


Рис. 1: Изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$ с наработкой

1. На первом участке (I, $[0, t_1]$) интенсивность отказов высока и уменьшается с течением времени. На этом участке выявляются грубые дефекты производства, сам участок I носит название участка приработки.

2. Второй участок (II, $[t_1, t_2]$) — период нормальной эксплуатации. Характерен тем, что интенсивность отказов имеет постоянное значение $\lambda(t) = \mathrm{const}$.

3. На третьем участке (III, $[t_2, \infty)$) из-за усиления процессов старения элементов интенсивность отказов начинает возрастать. Величина наработки t_2 может служить параметром, при достижении которого аппаратура должна сниматься с эксплуатации.

Интенсивность отказов — это наиболее удобная характеристика надёжности простейших элементов, так как она позволяет более просто вычислить количественные характеристики надёжности сложной системы.

6.4 Средняя и гамма-процентная наработка до отказа

Вообще говоря, различают

- среднюю наработку до отказа (Опр. 43, MTTF — Mean (operation) Time To Failure);
- и среднюю наработку между отказами (Опр. 45, MTBF — Mean (operation) Time Between Failures).

Эта дифференциация связана с тем, что вторая характеристика применима только к восстанавливаемым объектам. Для таких объектов можно рассматривать MTTF как среднюю наработку до *первого* отказа (в некотором смысле, как частный случай MTBF). Невосстанавливаемые же объекты по своему определению могут характеризоваться только величиной MTTF, но не MTBF. В рамках текущей темы мы пока ограничимся рассмотрением исключительно невосстанавливаемых объектов[3].

С точки зрения математической статистики, среднее значение $x_{\text{ср}}$ любой случайной величины $x \in [a, b]$ определяется как её математическое ожидание[4]

$$x_{\text{ср}} = \mathbb{M}[x] = \int_a^b x\, f(x)\, \mathrm{d}x, \tag{15}$$

где $f(x)$ — это плотность распределения соответствующей величины.

Из общей формулы (15) конкретно для MTTF имеем

$$MTTF = \mathbb{M}[t] = \int_0^\infty t\, f(t)\, \mathrm{d}t \underset{(4)}{=} -\int_0^\infty t\, \frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t}\, \mathrm{d}t = -\int_0^\infty t\, \mathrm{d}P(t).$$

Интегрируя по частям, получаем

$$-\int_0^\infty t\, \mathrm{d}P(t) = -tP(t)\Big|_0^\infty + \int_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t = \int_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t.$$

[3] Надёжности восстанавливаемых ИС посвящена четвёртая лекция данного курса

[4] Таким образом, всё сформулированное здесь относится не только к показателю «средняя наработка до отказа», но и к таким характеристикам, как «средний ресурс», «средний срок службы», «среднее время восстановления», «средний срок сохраняемости» и т. п.

Таким образом, связь средней наработки до отказа с ВБР имеет вид

$$MTTF = T_{\text{ср}} = \int_0^\infty P(t)\,\mathrm{d}t. \tag{16}$$

В частном случае экспоненциального закона распределения ВБР ($\lambda(t) = \lambda = \text{const}$) справедливо

$$MTTF = \int_0^\infty e^{-\lambda t}\,\mathrm{d}t = \frac{1}{\lambda}. \tag{17}$$

Статистическая оценка средней наработки до отказа имеет вид

$$\widehat{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N} t_j, \tag{18}$$

где N — количество работоспособных объектов при $t = 0$, а t_j — наработка до первого отказа j-го объекта. Формула (18) соответствует плану испытаний, при котором все объекты испытывают до отказа.

Гамма-процентной наработкой до отказа (см. выше Опр. 44 из ГОСТ Р 27.102-2021 [15]) называют показатель надёжности t_γ, являющийся корнем уравнения

$$P(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \tag{19}$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы.

Аналогичным образом вводятся в обращение и величины «гамма-процентный ресурс», «гамма-процентный срок службы», «гамма-процентный срок сохраняемости», «гамма-процентное время восстановления». Все эти характеристики определяются как корни уравнений

$$F(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}, \tag{20}$$

где $F(t)$ — функции распределения соответствующих показателей (ресурса, срока службы, сохраняемости и т. д.). С помощью (7) несложно убедиться в том, что определение (19) полностью соответствует общей формуле (20).

Таким образом, как видно из (20), гамма-процентные показатели (в том числе гамма-процентная наработка до отказа) равны квантилям соответствующих распределений. Если вероятности, отвечающие этим квантилям, выражают в процентах, то для показателей безотказности обычно задают значения 90; 95; 99; 99.5% и т. д. Тогда вероятность возникновения отказа на отрезке $[0, t]$ составляет 0.10; 0.05; 0.01; 0.005 и т. д. Задаваемые значения γ для критических отказов должны быть близки к 100%, чтобы сделать критические отказы практически невозможными событиями. Для прогнозирования потребности в запасных частях, ремонтных мощностях, а также для расчёта пополнения и

обновления парков машин, приборов и установок могут потребоваться гамма-процентные показатели при более низких значениях, например при $\gamma = 50\%$, что приближённо соответствует средним значениям.

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

7 Типовые законы распределения

7.1 Экспоненциальный

Это единственный закон с «отсутствием последействия». Применяется для электроники в период нормальной эксплуатации. Согласно этому закону распределения ВБР имеет следующий вид:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad \lambda = \text{const}. \tag{21}$$

7.2 Распределение Вейбулла — Гнеденко

ВБР в этом случае имеет вид

$$P(t) = e^{-(t/t_0)^\beta}, \tag{22}$$

и в первую очередь характеризуется параметром формы $\beta > 0$ (также часто называемым параметром Вейбулла). Значения $\beta < 1$ соответствуют приработке объекта, $\beta = 1$ — режиму нормальной эксплуатации, а $\beta > 1$ — износу объекта. Величину t_0 называют параметром масштаба.

Распределение Вейбулла эквивалентно экспоненциальному только в режиме нормальной эксплуатации ($\beta = 1$). В этом случае справедлива следующая связь интенсивности отказов λ с величиной t_0 в распределении Вейбулла (22)

$$\lambda = \frac{1}{t_0}.$$

В общем случае ($\beta \neq 1$) для получения интенсивности отказов $\lambda(t)$ в модели Вейбулла необходимо воспользоваться определением (11):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \underset{(4)}{=} -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t} \underset{(22)}{=} \frac{\beta\, t^{\beta-1}}{t_0^\beta}. \tag{23}$$

Здесь, при записи последнего выражения было использовано правило вычисления производной сложной функции

$$\frac{\mathrm{d}g(f(x))}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}g(f)}{\mathrm{d}f} \cdot \frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x}.$$

Применение этого правила позволяет вычислить функцию плотности распределения Вейбулла

$$f_{\mathrm{w}}(t) = \frac{\beta\, t^{\beta-1}}{t_0^{\beta}} e^{-(t/t_0)^{\beta}}. \tag{24}$$

Из (23) хорошо видно, что в случае $\beta > 1$ интенсивность отказов растёт, а при $\beta < 1$ — убывает с наработкой, как это и предполагалось при обсуждении рис. 1.

Полезно, наконец, сравнить распределение Вейбулла с экспоненциальным при некоторых сопоставимых значениях параметров. Наглядно это сравнение представлено ниже на рис. 2–4.

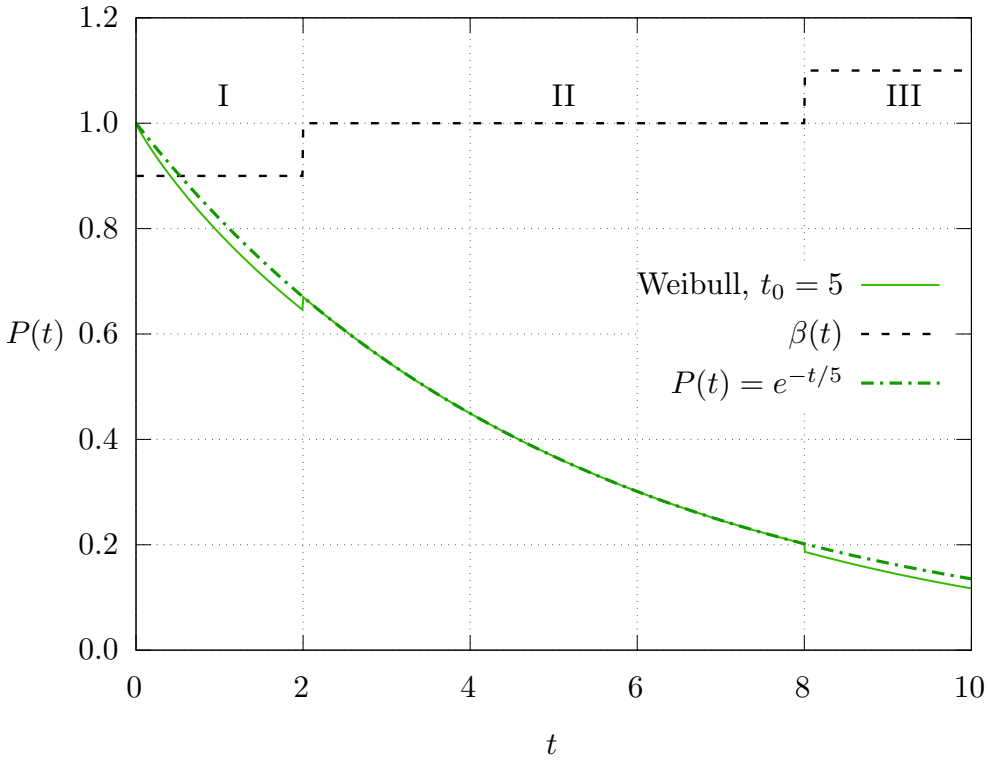


Рис. 2: Сравнение модели Вейбулла с экспоненциальной в случае скачкообразного изменения параметра β

7.3 Нормальное (Гауссовское) распределение

Нормальное распределение — это непрерывное симметричное распределение вероятностей случайной величины $x \in \mathcal{R}$, которое полностью определяется двумя параметрами: математическим ожиданием $\mu = \mathbb{M}[x]$ (центром распределения) и стандартным отклонением σ (шириной распределения). Стандартное отклонение σ связано с дисперсией случайной величины $\mathbb{D}[x]$ следующим образом

$$\sigma^2 = \mathbb{D}[x], \tag{25}$$

в то время как сама дисперсия является мерой разброса значений случайной величины относительно её математического ожидания:

$$\mathbb{D}[x] = \mathbb{M}\Big[(x - \mathbb{M}[x])^2\Big]. \tag{26}$$

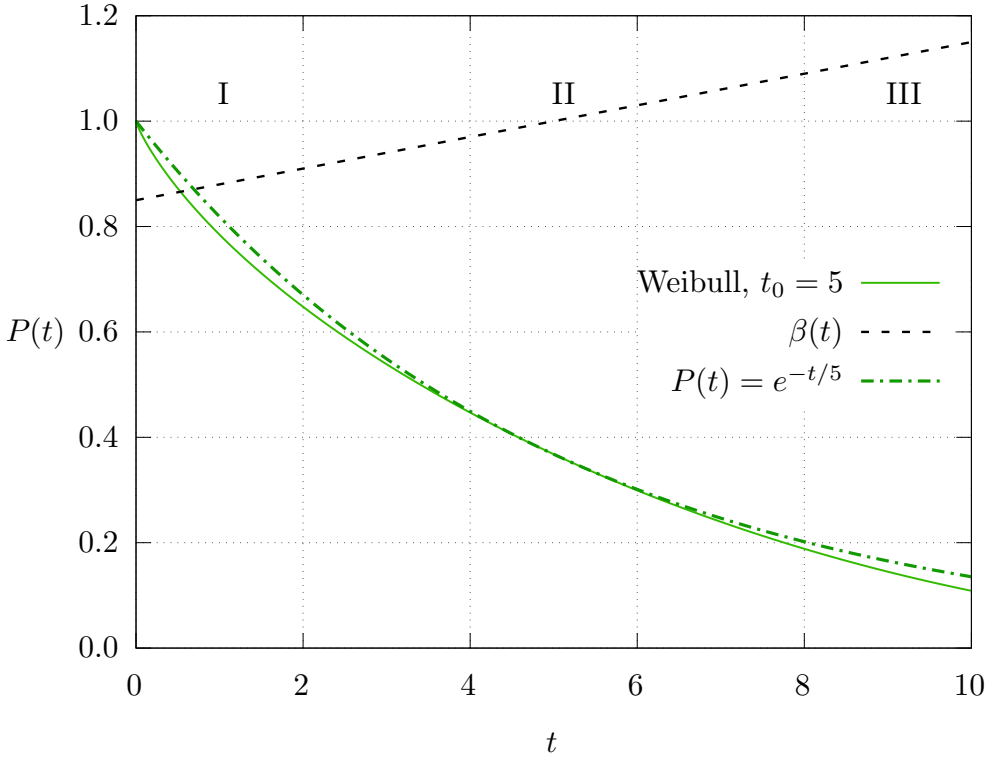


Рис. 3: Сравнение модели Вейбулла с экспоненциальной в случае линейного нарастания параметра β

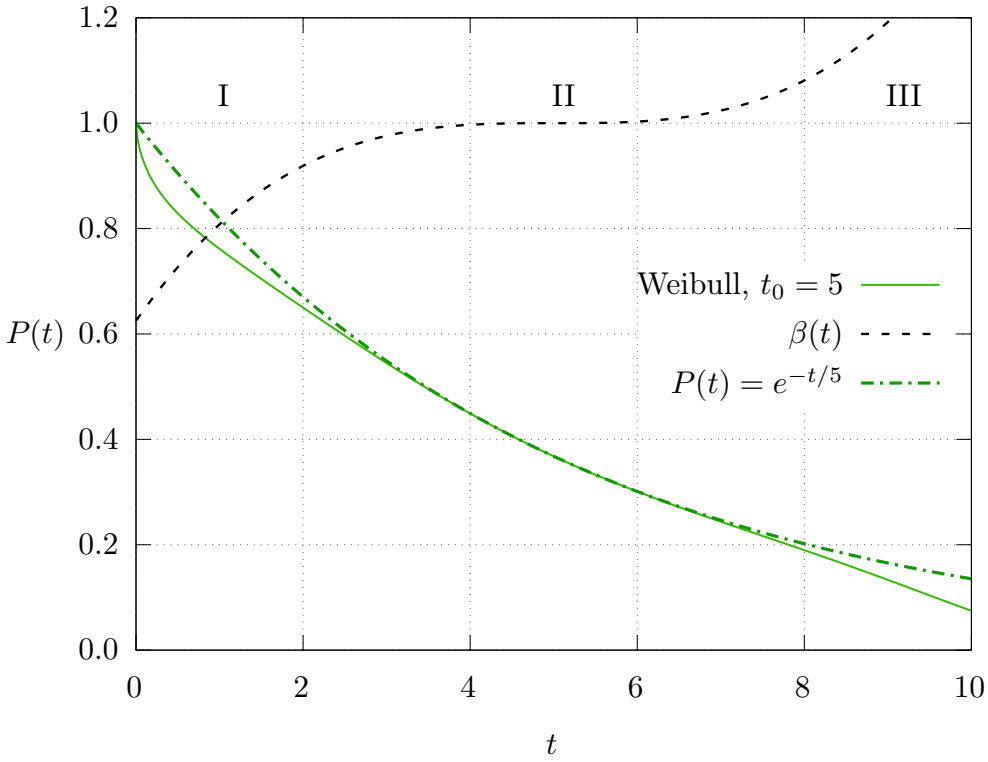


Рис. 4: Сравнение модели Вейбулла с экспоненциальной в случае нелинейного увеличения β

Функция плотности вероятности нормального распределения имеет вид:

$$f_{\mathrm{g}}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad x \in (-\infty, \infty) \tag{27}$$

Нормальное распределение возникает, когда случайная величина формируется под воздействием множества **независимых аддитивных (суммируемых)** факторов, каждый из которых вносит малый вклад (согласно ЦПТ — Центральной Предельной Теореме).

Примеры применения

- **Механические узлы и детали:** Точные размеры обработанных деталей (диаметр вала, толщина шайбы). Погрешность складывается из множества независимых факторов: микровибрации станка, неоднородность материала, износ инструмента, температурные деформации.
- **Погрешности измерений:** Ошибки измерительных приборов, тепловой шум в электронных компонентах.

Примечание: Поскольку время или наработка t не могут быть отрицательными ($t \geqslant 0$), нормальное распределение применяется для описания времени до отказа только в том случае, если $\mu \gg 3\sigma$ (вероятность попадания в отрицательную область ничтожно мала).

7.4 Логнормальное распределение

Говорят, что случайная величина x имеет логнормальное распределение, если её логарифм $\ln x$ распределён нормально. Это асимметричное (скошенное вправо) распределение, определённое на строго положительных значениях.

Функция плотности вероятности:

$$f_{\text{l}}(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad x > 0 \tag{28}$$

где μ и σ — это математическое ожидание и стандартное отклонение *логарифма*, а не самой величины x.

Логнормальное распределение возникает, когда случайная величина формируется под воздействием множества **мультипликативных (перемножаемых)** факторов.

Примеры применения

- **Время реакции ПО (Latency):** Время отклика системы часто складывается из последовательных этапов (запрос к БД, сетевые задержки, вычисления). Задержка на каждом этапе при этом часто входит в общую задержку множителем, а не слагаемым.
- **Процессы восстановления (MTTR):** Время на поиск неисправности, диагностику и ремонт. Если каждый этап требует времени, зависящего от сложности предыдущего этапа, то общее время имеет логнормальное распределение.

- **Усталостная долговечность:** Количество циклов до разрушения материала при усталости (например, рост микротрещин носит мультипликативный характер).

7.5 Резюме

Распределение Вейбулла является наиболее универсальным инструментом в теории надёжности, однако нормальное и логнормальное также встречаются достаточно часто (см. рис. 5). Главные принципиальные отличия всех рассмотренных нами здесь распределений заключаются в следующем.

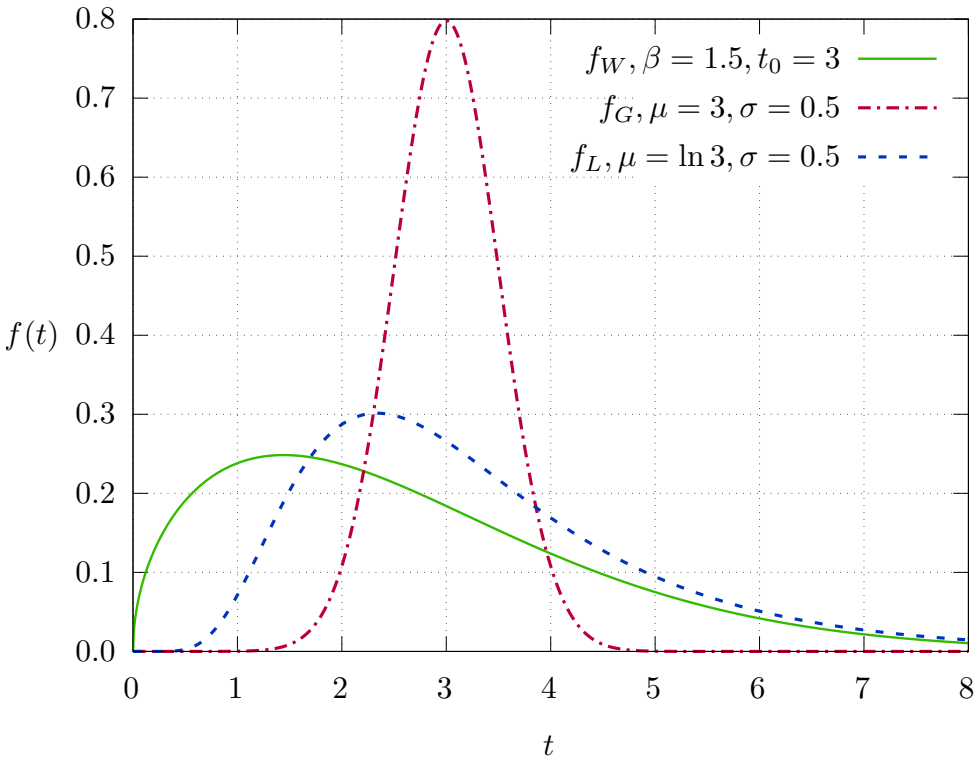


Рис. 5: Сравнение плотности $f(t)$ различных распределений

Физическая природа возникновения

- **Нормальное:** Аддитивные процессы (сумма независимых случайных возмущений).
- **Логнормальное:** Мультипликативные процессы (произведение независимых случайных факторов).
- **Вейбулла:** Подчиняется **принципу «слабого звена»** (экстремальные значения). Отказ происходит из-за того, что один конкретный дефект или нагрузка превысил предел прочности. Объект состоит из множества элементов, и отказывает тот, что слабее всех.

Область определения

- **Нормальное:** Определено на всей числовой прямой $(-\infty, \infty)$. Физически некорректно для времени, наработки или размеров, но часто используется даже для них как аппроксимация.
- **Логнормальное и Вейбулла:** Определены только на $[0, \infty)$[5], что идеально подходит для описания времени до отказа, времени восстановления и задержек.

Интенсивность отказов

Это самое важное отличие с точки зрения инженерных приложений теории надёжности.

- **Распределение Вейбулла** обладает уникальной гибкостью благодаря параметру формы β:
  - Если $\beta < 1$: интенсивность отказов *убывает* (что моделирует приработку и ранние отказы из-за скрытых дефектов).
  - Если $\beta = 1$: интенсивность *постоянна* (переходит в экспоненциальное распределение, моделирует случайные отказы).
  - Если $\beta > 1$: интенсивность *возрастает* (моделирует износ и старение).
- **Логнормальное распределение** имеет интенсивность отказов, которая сначала *возрастает*, достигает пика, а затем *убывает*. Оно хорошо описывает процессы старения, но не способно моделировать период приработки (убывающую интенсивность) или случайные отказы.
- **Нормальное распределение** имеет монотонно *возрастающую* интенсивность отказов, что делает его пригодным только для моделирования чёткого периода износа (когда все объекты выходят на ресурс одновременно).

Таким образом, если процесс восстановления или время отклика ПО имеют ярко выраженную асимметрию (большинство значений сгруппированы слева, но есть длинные «хвосты» редких, но очень долгих задержек) — используется **логнормальное** распределение. Если же требуется гибко моделировать весь жизненный цикл изделия (от приработки до износа) или анализировать прочность «слабого звена» применяется **распределение Вейбулла**. **Нормальное** распределение остаётся стандартом для геометрических допусков, погрешностей измерений и т. п.

[5] Строго говоря, логнормальное распределение справедливо на интервале $(0, \infty)$.

8 Контрольные вопросы и задания

1. Почему параметр MTBF, как правило, не применим непосредственно к самим микросхемам, но может использоваться для описания надёжности аппаратуры, построенной на их основе?
2. При каких условиях интенсивность отказов $\lambda(t)$ можно считать постоянной?
3. Докажите справедливость формулы (23).
4. Как изменение β в распределении Вейбулла отражает физическое состояние системы?
5. Постройте графики зависимости интенсивности отказов $\lambda(t)$ при нормальном и логнормальном распределении наработки до отказа.

Список литературы

1. *Матуско В. Н.*, *Лебедев Н. С.* Надёжность информационных систем. — Новосибирск : Сибирская государственная геодезическая академия, 2006. — С. 129.
2. *Расулова С. С.* Надёжность информационных систем. — Ташкент : Ташкентский университет информационных технологий, 2007. — С. 118.
3. *Ващенко Г. В.*, *Добронец Б. С.* Надёжность информационных систем. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2008. — С. 208.
4. Надёжность информационных систем / Ю. Ю. Громов [и др.]. — Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2010. — С. 160.
5. *Pradhan D. K.* Fault-Tolerant Computer System Design. — Prentice Hall, 1996. — P. 560.
6. *Modarres M.*, *Kaminskiy M. P.*, *Krivtsov V.* Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide. — 3rd Edition. — Boca Raton : CRC Press, 2016. — P. 522.
7. *Breneman J. E.*, *Sahay C.*, *Lewis E. E.* Introduction to Reliability Engineering. — 3rd Edition. — John Wiley & Sons, 2022. — P. 640.
8. *Гнеденко Б. В.*, *Беляев Ю. К.*, *Соловьев А. Д.* Математические методы в теории надёжности: Основные характеристики надёжности и их статистический анализ. — Изд. 3, стереотип. — Москва : URSS, 2024. — С. 584.
9. *Майерс Г.* Надёжность программного обеспечения. — Москва : Мир, 1980. — С. 360.
10. *Майерс Г.* Искусство тестирования программ. — Москва : Финансы и статистика, 1982. — С. 174.

11. *Jain R.* The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling. — John Wiley & Sons, 1991. — P. 720.

12. *Брукс Ф.* Мифический человеко-месяц или как создаются программные системы. — СПб : Символ-Плюс, 1999. — С. 304.

13. *Никитин В. Н.*, *Никитин Н. В.* Госпожа удачи: Прикладная теория вероятностей и диаграммная техника. Как легко и быстро решать прикладные задачи в области теории вероятностей при помощи подхода Фейнмана к квантовой механике. — Москва : ЛЕНАНД, 2023. — С. 408.

14. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. — 12-е изд. — Москва : Юрайт, 2026. — С. 479.

15. ГОСТ Р 27.102-2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения. — Москва, 2021.

16. IEC 60050-192. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 192: Dependability. — 2015.

17. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — Москва, 1989.

18. ГОСТ Р 53480-2009. Надёжность в технике. Термины и определения. — Москва, 2010.

19. ГОСТ Р 27.101-2021. Надёжность в технике. Надёжность выполнения задания и управление непрерывностью деятельности. Термины и определения. — Москва, 2021.