КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

 Основные термины и определения

**1. Надежность и ее стороны**

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость в отдельности или определенное сочетание этих свойств как для объекта, так и его частей.

Теория надежности исследует различные факторы, влияющие на уровень надежности, методы обеспечения и оценки надежности, а также закономерности изменения ее количественных характеристик. Надежность является частью более общего свойства изделия – качества. Технические характеристики объекта даются для некоторого момента времени – это ”точечные” характеристики. Надежность характеризует зависимость точечных характеристик от времени использования объекта.

Термины и определения установлены стандартами ГОСТ 27.002, 27.003 и другими. Стандарты предусматривают использование следующих основных понятий и определений:

**Надежность** – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Свойство надежности может быть приписано различным компонентам объекта. При исследовании надежности часто ставится задача определить причины, приводящие к формированию той или другой стороны надежности для определения путей повышения надежности. Это приводит к делению надежности на разные виды:

Физическая надежность **–** обуславливается физическими и химическими свойствами, условиями работы, нагружением и т.д.

Схемная надежность **–** обуславливается уровнем физической надежности отдельных элементов и схемой их взаимосвязи. Схемная надежность может быть повышена за счет *резервирования*.

Аппаратная надежность **–** обуславливается состоянием аппаратуры.

Программная надежность **–** обуславливается состоянием и качеством программного обеспечения.

Функциональная надежность **–** надежность выполнения отдельных функ­ций, возлагаемых на объект.

Надежность является комплексным свойством и включает в себя такие свойства, как:

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

Наработка – временное понятие, характеризующее продолжительность или объем работы объекта (в часах, циклах, километрах пробега и др.).

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

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

Невосстанавливаемое изделие – изделие, которое не может быть восстановлено потребителем и подлежит замене.

Восстанавливаемое изделие – изделие, которое может быть восстановлено потребителем.

Ремонтируемый объект– объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

Неремонтируемый объект **–** объект, ремонт которого невозможен или непредусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

**Сохраняемость** – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции в течение хранения и (или) транспортирования.

В каждом конкретном случае оценки или задания надежности изделия следует пользоваться теми сторонами и видами надежности, которые необходимы для характеристик надежности объекта с учетом его целевого назначения.

В прикладной теории надежности в понятие надежности могут включаться дополнительные свойства. Так, для характеристики надежности объектов, являющихся потенциальным источником опасности, используются свойства безопасности и живучести.

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

**Живучесть –** свойство объекта сохранять работоспособность (полностью или частично) в условиях неблагоприятных воздействий, не предусмотренных нормальными условиями эксплуатации.

2. **Состояния объекта**

Исправное состояние **–** состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние **–** состояние объекта, при котором он не удовлетворяет хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние **–** состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

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

Предельное состояние **–** состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Неисправное изделие может быть работоспособным, однако неработоспособное изделие всегда неисправно.

3. **Отказы**

В основе понятия надежности объекта лежит понятие его отказа.

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. По характеру возникновения отказы связаны либо с поломкой отдельных элементов при функционировании, либо с изменением параметров до недоступных пределов.

Отказ изделия – явление случайное, но причины, связанные с выявлением отказов, определяются физическими и физико-химическими процессами, происходящими в конструкции и материалах элементов в условиях эксплуатации и вследствие ошибок производства и проектирования.

Для различения отказов их классифицируют на: классификацию отказов математическую (вероятностную) и классификацию инженерную (физическую).

По причинам отказов можно разделить отказы на случайные и систематические. Случайные отказы могут быть вызваны перегрузками, дефектами материалов и изготовления, ошибками персонала, сбоями. Чаще всего проявляются в неблагоприятных условиях эксплуатации.

Систематические отказы возникают по причинам, вызывающим постепенное накопление повреждений (время, температура, облучение). Выражаются в виде износа, старения, коррозии, залипания, утечки и т.д.

Отказы внезапные – поломки.

Отказы постепенные – износ, старение.

По причинам возникновения отказы бывают конструкционные, технологические, эксплуатационные. Отказы нельзя смешивать с дефектами.

**Дефектом** называется каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным нормативной документацией. Этот термин применяем ко всем видам промышленной и непромышленной продукции.

Полный отказведет к полной потере работоспособности.

Частичный отказведет к частичной потере работоспособности.

Математическая классификация отказов:

Постепенные отказыразвиваются во времени и связаны со старением, износом, усталостной прочностью и другими факторами изменения свойств материала.

Внезапные отказы **–** на вероятность их появления не влияет время предыдущей работы.

Совместные отказы **–** отказы элементов объекта, могущие одновременно появиться в количестве двух и более.

Несовместные отказы **–** отказы, из которых никакие два не могут появиться вместе.

По взаимосвязи между собой отказы делятся на:

Независимые отказы **–** вероятности их появления не зависят друг от друга.

Зависимые отказы **–** вероятность появления одного отказа связана с вероятностью появления другого.

**Классификация отказов**

Зависимость от отказов

других объектов

Возможность последующего использования объектов

Наличие внешних

проявлений отказов

Возможность устранения
отказов

Характер изменения

основного параметра

отказов

Зависимый

Независимый

Полный

Частичный

Явный (очевидный)

Неявный (скрытый)

Устранимый

Неустранимый

Внезапный

Постепенный

Конструкционный

Производственный

Эксплуатационный

Причины возникновения

отказов по этапам жизни

Инженерная классификация отказов:

1. По выявлению:

– до выполнения функций;

– во время выполнения функций.

2. По последствиям:

– без последствий;

– приводит к невыполнению функций;

– приводит к происшествиям.

3. По причинам:

– конструктивно-производственные ошибки:

– ошибки оперативного персонала;

– внешние или случайные причины.

4. По способу устранения:

– восстановление работоспособности на месте эксплуатации:

– частичный ремонт в ремонтных службах;

– капитальный ремонт;

– списание объекта.

## *3.1. Модели отказов*

Схемы возникновения отказов:

* Схема мгновенных повреждений (внезапный отказ);
* Схема накапливающихся повреждений (постепенный отказ);
* Схема релаксаций (накопление → скачок);
* Схема действий нескольких независимых причин.

В соответствии этих схем используются следующие модели отказов:

* 1. Для внезапных отказов
* экспоненциальное распределение;
* распределение Вейбулла;
	1. Для постепенных отказов
* Нормальное распределение;
* Логарифмически нормальное;
* γ-распределение;
* Распределение Вейбулла.

Кроме понятия отказ в прикладной теории надежности и на практике могут использоваться другие понятия, связанные с нарушением работоспособности объекта:

Поломка **–** повреждение объекта, которое может быть устранено силами экипажа или ремонтных служб, не влекущее гибели людей.

Происшествие **–** событие, связанное с нарушением функционирования объекта вследствие его разрушения или повреждения.

Авария **–** полное разрушение объекта или такое его повреждение, что восстановление либо невозможно, либо нецелесообразно (но не влечет гибели людей).

Катастрофа **–** полное или частичное разрушение объекта, влекущее гибель хотя бы одного человека (если смерть людей в результате происшествия наступает в течение 10 суток после него).

4. **Эффективность**

Эффективность объекта **–** свойство объекта выдавать некоторый полезный результат (эффект) при использовании его по назначению.

2.2. Количественные показатели надежности

Перечень показателей надежности определяется стандартом ГОСТ 27.002-89. Этот стандарт оговаривает как единичные показатели надежности, каждый из которых характеризует отдельную сторону надежности (безотказность, долговечность, сохраняемость или ремонтопригодность), так и комплексные показатели надежности (рис. 8). Комплексные показатели характеризуют одновременно несколько свойств надежности.

Рис. 8

Показатели надежности делятся на нормируемые и оценочные. Значения нормируемых показателей регламентируется нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией. Оценочные значения показателей являются фактическими и их получают в результате испытаний или эксплуатации объекта.

Для некоторого объекта показатели надежности могут быть получены:

* расчетным путем;
* экспериментальным путем;
* путем экстраполирования известных показателей на другую продолжительность эксплуатации, или другие условия эксплуатации.

Перечень стандартных показателей надежности приведен в таблице 1.

Таблица 1

Номенклатура показателей надежности

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Свойствонадежности | Наименование показателя | Обознач. |
| Единичные показатели |
| Безотказность | Вероятность безотказной работы | P(t) |
|  | Интенсивность отказов | λ(t) |
|  | Средняя наработка на отказ | To |
|  | Средняя наработка до отказа | Tcp |
|  | Средняя наработка между отказами | T |
| Долговечность | Средний ресурс | Tp |
|  | Гамма-процентный ресурс | Tрγ |
|  | Назначенный ресурс | Tр.н |
|  | Установленный ресурс | Tр.у |
|  | Средний срок службы | Tсл |
|  | Гамма-процентный срок службы | Tслγ |
|  | Назначенный срок службы | Tсл.н |
|  | Установленный срок службы | Tсл.у |
| Сохраняемость | Средний срок сохраняемости | Tc |
|  | Гамма-процентный срок сохраняемости | Tcγ |
|  | Назначенный срок хранения | Tс.н |
|  | Установленный срок сохраняемости | Tс.у |
| Ремонтопригодность | Среднее время восстановления | Tв |
|  | Вероятность восстановления | Pв(t) |
| Комплексные показатели |
| Комбинация | Коэффициент готовности | Kг |
| свойств | Коэффициент технического использования | Kт.и |
|  | Коэффициент оперативной готовности | Kо.г |

При определении показателей надежности используются следующие понятия:

Наработка – продолжительность или объем работы объекта.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до прихода в предельное состояние.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта от начала его применения до наступления предельного состояния.

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта в заданных условиях, в течение и после которых сохраняются исправность, а также значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в пределах, установленных нормативно-технической документацией на данный объект.

Время восстановления – характеризует календарную продолжительность операций по восстановлению работоспособного состояния объекта или продолжительность операций по техническому обслуживанию.

Определение показателей надежности

**1. Показатели безотказности**

1.1. **Вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах заданной наработки tотказ не возникнет.

,

где Nр – число работоспособных объектов на момент t;

N – общее число наблюдаемых объектов;

n(t) – число объектов, отказавших на момент t от начала испытаний или эксплуатации.

Вероятность безотказной работы умень­­шается с увеличением времени работы или наработки объекта. Зависимость вероятности безотказной работы от времени характеризуется кривой убыли ресурса объ­екта, пример которой приведен на рисунке 9.

Рис. 9

В начальный момент времени для работоспособного объекта вероятность его безотказной работы равна единице (100 %). По мере работы объекта эта вероятность снижается и стремится к нулю.

Вероятность отказа характеризуется вероятностью возникновения отказа на момент времени t :

,

где n(t) – число объектов, отказавших на момент t от начала испытаний или эксплуатации;

Рис. 10

N – общее число наблюдаемых объектов.

Вероятность возникновения отказа объекта возрастает с увеличе­нием срока эксплуатации или наработки.

Пример зависимости вероятности возникновения отказа от времени показан на рисунке 10. Для работоспособного объекта в начальный момент времени вероятность отказа близка к нулю. Для того, чтобы отказ проявился, объекту необходимо начать работать, при этом вероятность отказа увеличивается с увеличением времени и стремится к единице.

Вероятность отказа может быть также охарактеризована плотностью вероятности отказа

 или ,

где  – число отказов за промежуток времени Δt;

N – общее число наблюдаемых объектов.

Пример 1. После 500 часов наработки из 56 агрегатов, поставленных на эксплуатацию, в работоспособном состоянии оказалось 43 агрегата. Определить вероятность безотказной работы агрегата в течение 500 час.

Решение:

Используем формулу для определения вероятности безотказной работы объекта

.

Вероятность безотказной работы агрегата в течение 500 часов составляет 76,8 %.

Пример 2. Для предыдущего примера определить вероятность отказа агрегат за 500 часов работы.

Решение:

Используем формулу для вероятности отказа



или

.

Таким образом, вероятность отказа агрегата за 500 часов составляет 23,2 %.

При определении вероятности безотказной работы и вероятности отказов широко используются две основных теоремы для определения вероятности случайного события.

1. Вероятность появления одного из двух несовместных событий равна сумме вероятности этих событий:

,

где A, B – несовместные события.

2. Вероятность совместного появления нескольких независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

.

Первая теорема используется для нахождения вероятности отказа при возможности у объекта нескольких видов несовместных отказов. С использованием второй теоремы определяют вероятность безотказной работы объекта, состоящего из многих элементов, вероятность безотказной работы которых известна.

Пример 3. Система состоит их 4-х агрегатов. Надежность каждого агрегата в течение времени t характеризуется вероятностью безотказной работы 90 %. Найти вероятность безотказной работы системы в течение времени t при условии независимости отказов агрегатов.

Решение:

Используем теорему вероятности совместного появления работоспособного состояния всех агрегатов:

.

Следовательно, вероятность безотказной работы системы в течение времени t равна 65,6 %.

Пример 4. В составе агрегата имеются 5 узлов. Вероятность отказа каждого узла в течение времени t составляет 5 %. Отказы узлов несовместны. Определить вероятность отказа агрегата.

Решение:

Используем теорему для вероятности хотя бы одного из нескольких несовместных событий:

.

Таким образом, вероятность отказа агрегата в течение времени t составляет 25 %.

2. **Интенсивность отказов** – характеризует скорость возникновения отказов объекта в различные моменты времени его работы:

,

где Δn(t) – число отказов за промежуток времени Δt;

Nр – число работоспособных объектов на момент t*.*

Интенсивность отказов может быть найдена теоретически

,

где f(t) – функция плотности вероятности наработки до отказа;

P(t) – вероятность безотказной работы,

.

Плотность распределения f(t) наработки до отказа может быть также определена по вероятности отказа

 или .

Вероятность безотказной работы связана с интенсивностью отказов одним из основных уравнений теории надежности:

.

В описанных способах оценки безотказности до первого отказа отказы не различаются по тяжести их последствий. В большинстве случаев при разработке объекта необходимо установить критерий отказа изделия по экономическим соображением, исчерпанию ресурса или другим характеристикам.

Критерием отказа называют признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической или конструкторской документации.

3. **Средняя наработка на отказ** – это отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки:

 ,

где N – общее число объектов, поставленных на испытания или в эксплуатацию;

t i – наработка i-того объекта;

m i – число отказов i-того объекта за весь наблюдаемый период.

Средняя наработка на отказ используется для характеристики восстанавливаемых объектов.

4. **Средняя наработка до отказа** – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа

 или  ,

где Npi – число работоспособных объектов на интервале наработки ti–ti+1;

N – общее число наблюдаемых объектов;

Δt = ti+1–ti – интервал времени;

k – число рассматриваемых интервалов наработки.

Среднюю наработку до отказа можно также определить иначе

 ,

где ti – наработка до отказа i-того объекта;

n – число объектов.

Показатель Тср используется для характеристики надежности невосстанавливаемых объектов.

5. **Средняя наработка между отказами** – математическое ожидание наработки объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа.

Вычисляется как отношение суммарной наработки объекта между отказами за рассматриваемый период к числу отказов за тот же период:

.

Показатели безотказности определяют на разных стадиях работы объекта с целью его совершенствования и с целью контроля нормируемых значений при эксплуатации.

**2.** **Показатели долговечности**

1. ***Средний ресурс*** – математическое ожидание ресурса

 ,

где Тpi – ресурс i-того объекта;

N – число объектов.

2. **Гамма-процентный ресурс** представляет собой наработку, в течении которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью (выражен в процентах (рис. 11)).

Для расчета показателя используется формула вероятности

,

где Тpγ *–* наработка до предельного состояния (ресурс).

Рис. 11

Гамма-процентный ресурс является основным расчетным показателем для подшипников и других элементов.

Существенное достоинство этого показателя – возможность его определения до завершения испытания всех образцов. В большинстве случаев используют 90 %-ный ресурс.

3. **Назначенный ресурс** – суммарная наработка Tpн, при достижении которой применение объекта по назначению должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

4. **Установленный ресурс** – технически обоснованная или заданная величина ресурса Тру, обеспечиваемая конструкцией, технологией и эксплуатацией, в пределах которой объект не должен достигать предельного состояния.

5. **Средний срок службы** – математическое ожидание срока службы.

,

где Тслi – срок службы i-того объекта.

6. **Гамма-процентный срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью γ, выраженной в процентах:

.

7. **Назначенный срок службы** – суммарная календарная продолжительность эксплуатации Тсл.н, при достижении которой применение объекта по назначению должно быть прекращено, независимо от его технического состояния.

8. **Установленный срок службы** – технико-экономически обоснованный или заданный срок службы Тсл.у, обеспечиваемый конструкцией, технологией и эксплуатацией, в пределах которого объект не должен достигать предельного состояния.

**3. Показатели сохраняемости**

1. **Средний срок сохраняемости** – математическое ожидание срока сохраняемости объекта:

,

где Тсi – срок сохраняемости i-того объекта.

2. **Гамма-процентный срок сохраняемости** – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течении и после которой показатели безотказности, долговечности и ремонтопригодности объекта не выйдут за установленные пределы с вероятностью γ, выраженной в процентах.

, – выражение для расчета показателя Тс γ.

3. **Назначенный срок хранения** – календарная продолжительность Тс.н. хранения в заданных условиях, по истечении которой применение объекта по назначению не допускается, независимо от его состояния.

4. **Установленный срок сохраняемости** – технико-экономически обоснованный (или заданный) срок хранения Тс.у., обеспечиваемый конструкцией и эксплуатацией в пределах которого показатели безотказности, долговечности, ремонтопригодности объекта сохраняются теми же, какими они были у объекта до начала его хранения и (или) транспортирования.

**4. Показатели ремонтопригодности**

1. **Среднее время восстановления** – математическое ожидание времени восстановления объекта

,

где Твк – время восстановления k-того отказа объекта;

m – число отказов за заданный срок испытаний или эксплуатации.

2. **Вероятность восстановления работоспособного состояния** – вероятность того, что объект будет восстановлен в заданное время tв. Для большинства объектов машиностроения вероятность восстановления подчиняется экспоненциальному закону распределения

,

где λ – интенсивность отказов (принимается постоянной).

**5. Комплексные показатели**

1. **Коэффициент готовности Кг** – вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Необходимо указывать интервал эксплуатации объекта, на котором следует оценивать коэффициент готовности Кг:

,

где ti – суммарная наработка i-того объекта в заданном интервале эксплуатации;

τi – суммарное время восстановления i-того объекта за тот же период эксплуатации;

N – число наблюдаемых объектов в заданном интервале эксплуатации.

Если на заданном интервале эксплуатации определены среднее значение наработки на отказ То и среднее время восстановления объекта после отказа Тв*,* то

.

2. **Коэффициент технического использования** – отношение математического ожидания наработки объекта за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий наработки, продолжительности технического обслуживания, плановых ремонтов и неплановых восстановлений за тот же период эксплуатации

.

3. **Коэффициент оперативной готовности** – вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусмотрено, и, начиная с этого момента, объект будет работать безотказно в течении заданного интервала времени:

,

где Р (t0; t1) – вероятность безотказной работы объекта в интервале (t0; t1);

t0 – момент времени, с которого возникает необходимость применения объекта по назначению;

t1 – момент времени, когда применение объекта по назначению прекращается.

Коэффициент Кг определяют для периода ожидания работы, предшествующего моменту t0.