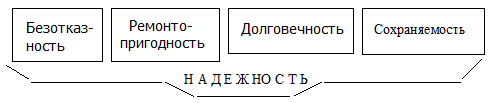
# 2. Теоретическая часть. Показатели надежности объектов и математические основы расчета систем на надежность

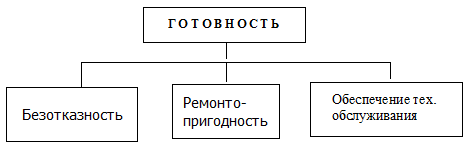
## 2.1. Основные понятия и определения теории надежности

### 2.1.1. Общие сведения

Согласно отечественному ГОСТ 27.002-89 **надежность** (Reliability) есть *способность изделия выполнять требуемые функции в заданных условиях в течение заданного периода времени*. В примечаниях к этому стандарту выделяют четыре составляющих Н свойства:



По стандарту МЭК (IEC) надежность (Dependability) – собирательный термин, применяемый для описания свойства готовности (системы, объекта) и влияющих на готовность свойств безотказности, ремонтопригодности и обеспечения тех. обслуживания/ ремонта:



В этом толковании понятия Н большое внимание уделено восстановлению работоспособности.

Проблема надежности – одна из важнейших в технике. Надежность является одной из важнейших характеристик качества всякого объекта. При этом надежность нельзя смешивать с другими характеристиками качества и противопоставлять им (нельзя, например, говорить «изделие высокого качества, но низкой надежности»). Вся история техники в значительной степени может рассматриваться и как борьба за повышение надежности. Наверное, наилучшим образом это подтверждает совершенствование электронно-вычислительных и радиоэлектронных средств (ЭВС и РЭС).

В зависимости от **способа анализа объекта** разделяют два больших класса методов расчёта надёжности: **структурные и функциональные.**

Структурная надежность [1, 3] – это результирующая надежность при заданной структуре технической системы и известных значениях показателей надежности всех входящих в эту систему элементов. Для расчета структурной надежности должны быть известны схема и конструкция устройства (системы) и показатели надежности всех элементов.

Расчёт **функциональной надёжности**  - это определение показателей надёжности выполнения объектом заданных функций. Поскольку такие показатели надёжности зависят от ряда действующих факторов (вида заданной функции, структурной надёжности, математического и программного обеспечения, работы операторов) то, как правило, расчёт функциональной надёжности более сложен, чем расчёт структурной надёжности.

В любом ТЗ на разработку устройства, системы всегда записываются требования по надежности. Надежность закладывается при проектировании, реализуется в производстве и поддерживается при эксплуатации изделий. То есть вопрос о будущей надежности решается на этапах жизненного цикла изделий, начиная с составления ТЗ.

Неотъемлемой частью системы обеспечения качества (в соответствии со стандартами ИСО 9001 – 9003) является система обеспечения надежности. Принципы функционирования такой системы устанавливаются стандартом ИСО 9000-4:93/ МЭК 300-1:93 “Руководство по управлению программой обеспечения общей надежности”. Центральными понятиями стандарта являются программа обеспечения общей надежности (ПОН) и план обеспечения общей надежности. Под “общей надежностью” понимается собирательный термин, используемый для определения характеристики эксплуатационной готовности и влияющих на нее факторов, а именно: характеристик надежности, ремонтопригодности и обеспечения технического обслуживания **/** ремонта. Термин используется для общих описаний без количественной оценки.

ПОН содержит перечень работ и мероприятий по обеспечению надежности, в частности:

* организационно-технические мероприятия;
* расчетно-теоретические работы;
* исследовательские, экспериментальные и испытательные работы;
* производственно-технологические работы;
* мероприятия по информационногму обеспечению (сбору данных о всех процессах, связанных с созданием системы, и анализу этих данных).

Важной составной частью ПОН является анализ дефектов разрабатываемой системы.

На каждой стадии создания изделия ПОН содержит перечень работ, проводимых на следующей стадии, и предварительный перечень работ для более поздних стадий. Так ПОН на стадии “техническое предложение” содержит полный перечень работ по обеспечению Н, планируемых на стадии “Эскизный проект”.

Исследования в области надежности становятся на прочную основу только при наличии в распоряжении инженера *критериев и показателей*, позволяющих производить сравнительную количественную оценку, расчеты и испытания на надежность.

***Критерий*** – признак, мерило, на основании которого производится оценка, определение или сравнение.

***Показатель надежности*** – *количественная характеристика одного или нескольких единичных свойств, определяющих надежность объекта.* Соответственно различают единичные и комплексные показатели. Для оценки надежности среди показателей выбирают тот, который для конкретного объекта и конкретных условий его применения наилучшим образом выражает комплексное свойство надежности. Такому показателю придают функцию критерия надежности и именно его нормируют, как правило, в ТЗ и разрабатываемой на данный объект технической документации. Случаи, когда нормируется один показатель Н, а при сравнении вариантов используется другой, составляют исключения.

Необходимо отличать критерий надежности от критерия отказа и критерия предельного состояния. *Критерий отказа* – признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта; эти признаки должны быть прописаны в НТД и (или) КД. Аналогично трактуется *критерий предельного состояния.*

Соответственно различным сторонам (составляющим) надежности введены показатели безотказности, долговечности, сохраняемости, достоверности… Выбор и обоснование номенклатуры показателей Н должен производиться с учетом специфики объекта, его назначения и условий эксплуатации.

Существенным фактором является *восстанавливаемость* или *невосстанавливаемость* объекта. Объект относят к группе восстанавливаемых (ВО), если его восстановление предусмотрено документацией и технически возможно на месте эксплуатации. Восстанавливаемые объекты кроме оценки надежности по единичным показателям характеризуются еще и комплексными показателями. Это, прежде всего, вероятность того, что восстанавливаемый объект окажется работоспособным в произвольный момент времени. Такой показатель учитывает свойства безотказности и восстанавливаемости.

Показатели надежности относятся к категории показателей, используемых для характеристики случайных величин и случайных событий. Уже из самого определения надежности следует, что количественно выразить свойство сохранения во времени некоторой совокупности параметров в каких-либо единицах (по примеру выражения физических свойств объекта) невозможно.

Далее рассматриваются математические и статистические определения показателей надежности, прежде всего ее важнейшей и наиболее существенной в выполняемой работе стороны - безотказности.

### 2.1.2. Показатели безотказности

***Безотказность* –** свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов [1,3,5]. Соответственно фундаментальным в теории надежности является понятие ***отказа*** как события, заключающегося в нарушении работоспособного состояния.

В зависимости от условий и причин возникновения отказы классифицируются на постепенные и внезапные, независимые и зависимые, самоустраняющиеся и устраняемые вмешательством извне. По связи причины возникновения с этапом жизненного цикла изделия различают отказы конструкционные, производственные и эксплуатационные.

Далее показатели безотказности рассматриваются для двух групп объектов: сначала невосстанавливаемых, а затем – восстанавливаемых.

1. **Вероятность безотказной работы (ВБР)** *P(t) = P(T ≥ t),* (2.1)

где Т – время непрерывной работы объекта до первого отказа (фактически Т - время события отказа).

Соответственно **вероятность отказа** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет - определяется как

*Q(t) = 1 – P(t)*. (2.2)

Функция Q(t) – это функция распределения случайной величины Т.

Приведенные математические выражения *P(t)* и *Q(t)* отражают составленную математическую модель. Однако в реальности показатели Н чаще всего определяются из опытных данных. В таких случаях речь идет о *статистическом определении показателей Н*. Выражениям (2.1), (2.2) соответствуют статистические вероятности (частости):

 , (2.3)

где N(0) – число изделий, поставленных на испытания; n(t) – число изделий, отказавших за время t испытаний;

. (2.4)

1. **Плотность вероятности отказа** в момент времени t

. (2.5)

Соответствующая статистическая оценка получается по результатам наблюлений за работой N(0) изделий как отношение числа отказавших в единицу времени изделий к общему числу изделий при условии, что отказавшие изделия не воотанавливаются:

 . (2.6)

3) **Интенсивность отказов λ(t)**. Это условная плотность вероятности возникновения отказа [1,2] невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. То есть λ(t) есть плотность распределения, отнесенная к вероятности безотказной работы:

. (2.7)

В статистической трактовке интенсивность отказов  есть отношение числа отказов в единицу времени на интервале Δt, примыкающему к моменту времени t. Можно также сказать, что статистическая интенсивность отказов  подсчитывается как отношение числа отказавших в единицу времени изделий к среднему числу Np работоспособных на рассматриваемом отрезке времени изделий:

 . (2.8)

При постоянстве функции плотности вероятности интенсивность отказов растет (ведь Np убывает).

Интенсивность отказов, плотность вероятности и вероятность безотказной работы связаны соотношением (2.9)

 . (2.9)

Отсюда после разделения переменных

 . (2.10)

И после интегрирования обеих частей уравнения (2.10):

 . (2.11)

где P0 – вероятность ненаступления отказа при t = 0; для изначально работоспособного устройства Р0 = 1.

Из (11) следует, что

, (2.12)

откуда

****. (2.13)

***Это соотношение является в теории Н одним из основных.***

В частном случае при λ = const

. (2.14)

К слову сказать, постоянство λ соответствует экспоненциальному убывающему характеру функции f(t).

Функцию зависимости интенсивностей отказов λ(t) от времени называют лямбда-характеристикой, кривой «жизни» элемента (рис. 2.1). Иногда ее график именуют “ваннообразной” кривой.

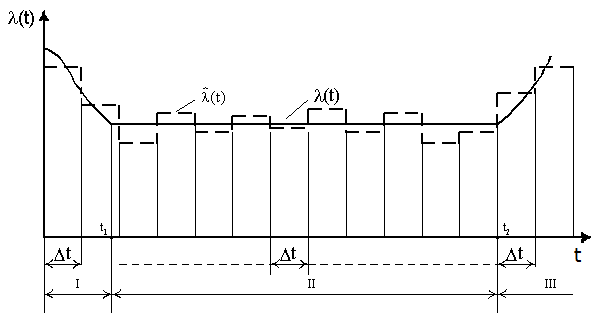


Рисунок 2.1 - Лямбда-характеристика:

- - - опытные данные; ----- линеаризованная усредненная кривая; I – интервал приработки; II – интервал нормальной эксплуатации; III – интервал старения.

Кривая имеет три явно выраженные области: I. II и III. В области I интенсивность отказов высока, что обусловлено выходом из строя изделий в первый период работы из-за наличия скрытых дефектов, не обнаруженных на этапе производства. Область II характеризуется незначительно изменяющейся (примерно постоянной) интенсивностью отказов и соответствует периоду нормальной эксплуатации. И, наконец, в области III интенсивность отказов резко возрастает из-за старения и износа и в связи с наступлением предельного состояния.

1. **Средняя наработка до отказа Т1**.

В математической трактовке этот показатель определяется как среднее взвешенное значение случайного времени наступления отказа, то есть – математическим ожиданием случайной величины с плотностью распределения f(t):

, (2.15)

а в статистической трактовке:

. (2.16)

Для невосстанавливаемых объектов статистику набирают на множестве одинаковых объектов в одинаковых условиях.

Интересно установить связь рассматриваемого показателя Т1 с интенсивностью отказов. Вернемся к математическому выражению (2.15) и сделаем некоторые преобразования:

 . (2.17)

Здесь учтено, что Q(∞) → 1, а Q(0) → 0.

Таким образом, . (2.18)

Отсюда следует, что в распространенных случаях применимости выражения (2.14)



 . (2.19)

1. Гамма-процентная наработка (γ-%-я наработка)

Прежде всего, зачем она введена. Дело в том, что средняя наработка Т1 до отказа соответствует весьма низкому значению ВБР, а именно

. (2.20)

С целью оценки наработки на приемлемом уровне безотказности и введено понятие γ-%-я наработки.

Гамма-процентная наработка до отказа Тγ – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ, выражаемой в процентах.

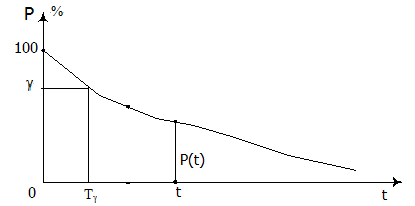


Рисунок 2.2 - К пояснению гамма-процентной наработки по кривой убыли вероятности безотказной работы Р(t)

При известном значении λ (найденном с помощью компьютерной системы расчета) при экспоненциальном законе распределения гамма-процентная наработка Тγ находится [1-3 , 5] по формуле

. (2.21)

### 2.2.3. Показатели безотказности и ремонтопригодности восстанавливаемых систем

1) Средняя наработка на отказ – это отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки (наработка-продолжительность или объем работы объекта).

 , (2.22)

где r(t) – число отказов в течение наработки t;

r(t2 – t1) – число отказов в течение наработки (t2 – t1).

Математическому выражению *Т0* (2.22) соответствует следующая статистическая оценка показателя

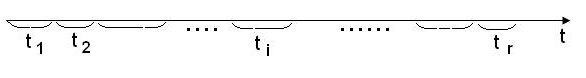
, (2.23)

где ri - число отказов (refuse по англ. – отказ) для i –го эксперимента, проводимого как с множеством восстанавливаемых объектов, так и с каждым из них.

2) Для восстанавливаемых же объектов вводят параметр Тср “средняя наработка между отказами”. Это – математическое ожидание наработки объекта от окончания восстановления его работоспособности после отказа до возникновения следующего отказа. Статистическая оценка данного показателя:

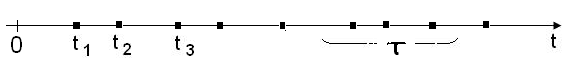
, (2.24)

где r – число отказов за рассматриваемый период.



Простейший поток событий характеризуется стационарностью,

ординарностью, отсутствием последействия.



Для простейшего потока число событий, попадающих на любой фиксированный интервал времени, распределено по закону Пуассона, а именно: вероятность Рm появления m событий в заданном интервале t определяется формулой

 . (2.25 )

Здесь А - среднее число событий, происходящих с интенсивностью λ;

А = λ· t.

3) В качестве показателя надежности восстанавливаемых (ремонтируемых) систем часто используют ***параметр потока отказов******ω (t).***

Если в качестве функции отказов потока использовать функцию

 , ( 2.26)

где r(t) – число отказов до наработки t; N0– число поставленных на эксплуатацтю (испытания) изделий,

то  . (2.27)

Величина *ω (t)* характеризует среднее количество отказов в единицу времени, взятое для рассматриваемого момента времени.

Статистическое определение:

 . (2.28)

*Для стационарных потоков* ***ω*** *совпадает с интенсивностью отказов* ***λ****.*

3)ВБР ***P ( t 1 , t 2 )***. Речь идет о вероятности безотказной работы в указанном интервале времени.

. (2.29)

При стационарном потоке ω = const

. (2.30)

3) **Вероятность восстановления.** Интервал времени от момента отказа до момента восстановления является случайной величиной θ. Интегральная функция распределения этой величины выражает вероятность того, что величина θ не превысит заданного времени:

PB (t) = P (θ < t) . (2.31)

4) Среднее время восстановления математически выражается на основе функции (27):

. (2.32)

, (2.33)

где tBi – время обнаружения и устранения i-го отказа объекта.

1. Коэффициент готовности

 (2.34)

где Тср0 - среднее время безотказной работы; Тв – среднее время восстановления.

Иногда удобнее пользоваться коэффициентом простоя

 (2.35)