

2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Типы объектов и режимы их эксплуатации

На состав показателей и построение моделей надежности существенное влияние оказывает тип объекта и режим его эксплуатации.

Тип объекта определяется решением, принимаемым после отказа. Если в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособности конкретного объекта в случае его отказа признается невозможным (восстановление интегральной схемы), нецелесообразным по техническим или экономическим причинам (ремонт "мышки") или неосуществимым (оборудование спутника на орбите), то такой объект является *невосстанавливаемым* в данной ситуации. Объекты этого типа могут иногда подвергаться восстановлению вне места эксплуатации. Например, ошибки в исходном тексте программы устраняются разработчиком или организацией, ответственной за сопровождение программы, а исправленный файл с программой или "заплата" передается пользователям для устранения дефекта.

Для *восстанавливаемого* объекта предполагается, что при возникновении отказа его работоспособность подлежит восстановлению в конкретных условиях эксплуатации. Под восстановлением понимается ремонт той или иной части объекта, замена частей на совершенно другие работоспособные части, а в ряде случаев полная замена всего отказавшего объекта на работоспособный.

Один и тот же объект в зависимости от условий эксплуатации или ее этапов может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым, например, электронное оборудование связного спутника при подготовке к запуску и после запуска на орбиту.

Режим эксплуатации определяет чередование *периодов ожидания*, когда по условиям эксплуатации объект не функционирует, но готов к немедленному приведению в действие, и *периодов применения* по назначению (периодов действия). Возникновение отказов и повреждений возможно в течение того и другого периодов, но во время периода ожидания расход ресурса объекта отсутствует или существенно меньше, чем во время периода применения. Для многих типов устройств, в том числе и электронных, изменение режима эксплуатации более вредно для обеспечения безотказности, чем длительное нахождение в режиме применения. Например, включение – выключение электропитания приводит к тепловым "ударами", изменяющим размеры электронных устройств и нарушающим их соединения, способствует появлению трещин в местах пайки и другим дефектам.

Возможны следующие основные виды режимов эксплуатации:

непрерывный. Период действия длится непрерывно в течение всего времени эксплуатации или продолжается достаточно длительное время. В этом случае время эксплуатации совпадает с календарным временем;

периодический. Периоды действия и простоя чередуются. Чередование может происходить с постоянной цикличностью или некоторым случайным образом. Периоды могут различаться и условиями эксплуатации. Наличие периодов простоя приводит к тому, что календарное время не совпадает с продолжительностью эксплуатации.

2.2. Характеристика показателей надежности

Показатель надежности является размерной или безразмерной величиной. Он количественно характеризует одно или несколько частных свойств надежности объекта, т.е. определяет в какой степени данному объекту присуще определенное свойство (свойства), обуславливающие надежность. Показатели надежности представляют в вероятностной или статистической форме. Вероятностная форма удобна для применения при аналитических расчетах, а статистическая – при экспериментальном исследовании надежности объекта. Кроме того, одни показатели проще интерпретировать в вероятностной форме, а другие – в статистической.

Применительно к невозстанавливаемым объектам статистические показатели формируются исходя из такой схемы испытаний или эксплуатации объектов, при которой эти объекты работают с момента времени, равного нулю, до отказа. Продолжительность наработки до отказа считается случайной величиной. В этом случае статистические показатели надежности допускают простое частотное толкование. А с ростом количества испытываемых объектов статистические показатели будут сходиться к аналогичным вероятностным показателям.

Процесс эксплуатации восстанавливаемых объектов представляет собой в общем случае последовательность случайных интервалов работоспособности ξ_i , чередующихся со случайными интервалами простоя τ_i . Математической моделью процесса эксплуатации является соответствующий случайный процесс. В общем случае функции распределения случайных величин ξ_1, ξ_2, \dots могут отличаться друг от друга. Это объясняется тем, что в очередной момент начала работы после восстановления объект характеризуется вполне определенным состоянием. Обычно рассматривают характеристики наработки до первого отказа и стационарные характеристики, соответствующие времени, достаточно удаленному от начала эксплуатации. В последнем случае считается, что начальные состояния оказываются одинаковыми и наработки до очередного отказа имеют одинаковое распределение. Аналогично рассматриваются и характеристики времени восстановления. Практически во всех случаях предполагают независимость чередующихся величин ξ_i и τ_i , а их распределение считают независимым от номера i . Такой случайный процесс получил название альтернирующего.

При выборе номенклатуры показателей надежности и их определении следует руководствоваться государственными стандартами и другими нормативно-техническими документами [2, 4]. В существующей НТД

определено несколько десятков показателей надежности объектов, различающихся по своему содержанию для технических и программных средств, а также для АСОИУ в целом. Эти показатели были первоначально сформированы для технических средств, а затем после появления автоматизированных систем нашли применение для характеристики надежности других компонентов этих систем. Рассмотрим сначала традиционное представление показателей надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов. Сами показатели, если не касаться причин возникновения отказов и содержательной стороны процессов функционирования и восстановления, применимы для любых изделий.

2.3. Показатели надежности невосстанавливаемых объектов

Невосстанавливаемые объекты работают до первого отказа. Основными показателями надежности таких объектов являются показатели безотказности. Рассмотрим вероятностное и статистическое определение показателей [8].

Вероятность безотказной работы в интервале от 0 до t_0 . Эта вероятность сопоставляется с заданной наработкой, в течение которой возможно возникновение отказа. Предполагается, что в начальный момент времени исчисления наработки объект был работоспособным.

Вероятностное определение соответствует вероятности $P(t_0)$ того, что объект проработает безотказно в течение времени t_0 , начав работать в момент времени $t = 0$, или вероятности того, что наработка до отказа окажется больше заданного времени работы

$$P(t_0) = P(0, t_0) = P(\xi > t_0) = 1 - F_1(t_0), \quad (2.1a)$$

где $F_1(t_0)$ – функция распределения времени до первого отказа объекта; ξ – случайная наработка объекта до первого отказа.

Статистическое определение соответствует частоте события, состоящего в том, что время работы изделия до отказа окажется больше заданного времени работы t_0

$$P^*(t_0) = N(t_0) / N(0) = 1 - n(t_0) / N(0), \quad (2.1б)$$

где $N(t_0)$ – количество объектов, безотказно проработавших до момента t_0 ; $N(0)$ – количество работоспособных объектов в начальный момент времени $t = 0$; $n(t_0)$ – количество изделий, отказавших к моменту времени t_0 .

Вероятность отказа объекта в интервале времени от 0 до t_0 определяется как дополнительная к вероятности безотказной работы

$$Q(t_0) = 1 - P(t_0). \quad (2.2)$$

Эта величина характеризует вероятность того, что время наработки до отказа будет меньше заданного значения. Вероятность отказа соответствует значению функции распределения времени наработки до отказа.

Вероятность безотказной работы объекта $P(t, t + t_0)$ в интервале времени от t до $t + t_0$ рассматривается как условная вероятность.

Существует два варианта вероятностного определения $P(t, t + t_0)$:

$P(t, t + t_0)$ это вероятность того, что объект будет безотказно работать до момента времени $t + t_0$, начиная с момента времени t ;

$P(t, t + t_0)$ это условная вероятность того, что случайная наработка объекта до отказа будет не меньше величины $t + t_0$ при условии, что объект уже проработал безотказно до момента времени t .

Следовательно, вероятностное определение

$$\begin{aligned} P(t, t + t_0) &= P(\xi \geq t + t_0 | \xi > t) = P(0, t + t_0) / P(0, t) = \\ &= P(t + t_0) / P(t). \end{aligned} \quad (2.3a)$$

Статистическое определение соответствует отношению количества объектов, проработавших безотказно до момента времени $t + t_0$ к количеству объектов, исправных к моменту времени t , или частоте события, при котором наработка объекта до отказа окажется не меньше $t + t_0$ при условии, что эта реализация больше времени t

$$P^*(t, t + t_0) = N(t + t_0) / N(t). \quad (2.3б)$$

Вероятность отказа объект в интервале времени от t до $t + t_0$ определяется как дополнительная к соответствующей величине

$$Q(t, t + t_0) = 1 - P(t, t + t_0) = [P(t) - P(t + t_0)] / P(t). \quad (2.4)$$

Плотность распределения отказов соответствует плотности вероятности того, что время работы объекта до отказа окажется меньше t , или плотности вероятности отказа к моменту времени t .

Вероятностное определение

$$f(t) = dF(t)/dt = dQ(t)/dt = -dP(t)/dt. \quad (2.5a)$$

Статистическое определение соответствует отношению количества отказов в интервале времени $[t + \Delta t]$ к произведению количества исправных объектов в начальный момент времени $t = 0$ на длительность интервала времени Δt (величина Δt достаточно малая)

$$\begin{aligned} f^*(t) &= [n(t + \Delta t) - n(t)] / [N(0) \Delta t] = \\ &= [N(t) - N(t + \Delta t)] / [N(0) \Delta t]. \end{aligned} \quad (2.5б)$$

Интенсивность отказов объекта в момент времени t – это условная плотность вероятности отказа изделия к моменту времени t при условии, что до этого момента отказ объекта не произошел.

Вероятностное определение

$$\lambda(t) = 1 / [1 - F(t)] dF(t)/dt = f(t)/P(t). \quad (2.6a)$$

Статистическое определение соответствует отношению количества отказов в интервале времени $[t + \Delta t]$ к произведению количества исправных объектов в момент времени t на длительность интервала времени Δt

$$\lambda^*(t) = [N(t) - N(t + \Delta t)] / [N(t) \Delta t]. \quad (2.6б)$$

При таком определении интенсивность отказов соответствует относительной частоте отказов в единицу времени.

Знание любой рассмотренной функции позволяет определить остальные, табл. 2.1.

Таблица 2.1

Определяемый показатель надежности	Известный показатель надежности			
	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$

$P(t)$	$P(t)$	$1 - Q(t)$	$\int_t^{\infty} f(x)dx$	$\exp\left[-\int_0^t \lambda(x)dx\right]$
$Q(t)$	$1 - P(t)$	$Q(t)$	$\int_0^t f(x)dx$	$1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(x)dx\right]$
$f(t)$	$-dP(t)/dt$	$dQ(t)/dt$	$f(t)$	$\lambda(t)\exp\left[-\int_0^t \lambda(x)dx\right]$
$\lambda(t)$	$\frac{-d[\ln P(t)]}{dt}$	$\frac{dQ(t)}{dt} \times \frac{1}{1 - Q(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(x)dx}$	$\lambda(t)$

Средняя наработка объекта до отказа – это математическое ожидание времени работы объекта до отказа.

Вероятностное определение

$$T = \int_0^{\infty} tf(t)dt = -\int_0^{\infty} t \frac{dP(t)}{dt} dt = -[tP(t)]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (2.7a)$$

Статистическое определение соответствует среднему значению наработок ξ_i объектов до отказа

$$T^* = (\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{N(0)})/N(0). \quad (2.7б)$$

Вполне понятно, что у рассматриваемого типа объектов нет показателей ремонтпригодности (восстанавливаемости).

Долговечность характеризуется следующими показателями:

γ -процентный ресурс. Соответствует наработке, которая обеспечивается для объекта в обусловленной доле. Эта доля задается в процентах и соответствует вероятности того, что объект обладает требуемой наработкой до предельного состояния. Пример задания долговечности – 90%-й ресурс при наработке 10 000 часов. Величина γ обычно устанавливается в диапазоне 90 – 98%;

назначенный ресурс. Это наработка, после которой эксплуатация прекращается независимо от технического состояния. Устанавливается для тех изделий, отказ которых приводит к тяжелым последствиям;

гарантийный срок службы (гарантированный ресурс). Календарное время, в течение которого изготовитель берет на себя обязанность в случае отказа устранить его своими силами и средствами.

Во многих случаях эти показатели играют лишь справочную роль при выборе изделия, так как обычно гарантийные обязательства поставщика (изготовителя) истекают ранее окончания гарантированного ресурса, да и у пользователя нет средств объективного измерения расхода ресурса. Например, гарантированный ресурс принтера 30 000 отпечатанных листов, который расходуется в течение нескольких лет, а срок гарантийного обслуживания составляет один год.

2.4. Показатели надежности восстанавливаемых объектов

Средства автоматизации рассчитаны на длительный период эксплуатации. После отказа работоспособность изделия восстанавливается, и оно вновь применяется по назначению. Процесс восстановления технических средств чаще всего заключается в замене отказавшего невосстанавливаемого элемента исправным.

Планирование работы ремонтных органов, обеспечение запасными частями, решение других задач технической эксплуатации опирается на знание распределения отказов во времени с детализацией по элементам системы. Полная характеристика надежности предполагает задание функции распределения времени безотказной работы и времени восстановления. Однако на практике определение этих функций для реальных объектов в большинстве случаев невозможно. Поэтому применяются менее информативные показатели, оценка значений которых практически осуществима.

Восстанавливаемые объекты характеризуются тремя группами показателей, а именно, показателями безотказности, восстанавливаемости и комплексными показателями. Кроме того, могут задаваться показатели долговечности, сущность которых идентична показателям невосстанавливаемых объектов. С целью сокращения объема изложения будут приведены только вероятностные определения наиболее часто применяемых показателей (статистические определения составить достаточно просто по аналогии с рассмотренными выше).

Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов применимы и для восстанавливаемых изделий на интервале времени до первого отказа. Однако восстанавливаемые изделия обычно характеризуются другими показателями. Рассмотрим показатели применительно к стационарному режиму работы изделия. В многих случаях предполагается, что время безотказной работы и время восстановления имеют непрерывные распределения. Введем обозначения:

$F(t)$ и $f(t)$ – функция распределения и плотность распределения времени наработки между отказами соответственно. По определению функция распределения это вероятность того, что случайная величина ξ не превысит некоторое заданное значение t . В данном случае это означает, что изделие отказало до момента t ;

$G(t)$ и $g(t)$ – функции распределения и плотность распределения времени восстановления. Функция $G(t)$ характеризует вероятность того, что случайное время восстановления τ не превысит заданного значения t ;

ξ_k – случайное время работы (случайная наработка) изделия перед k -м отказом после $(k - 1)$ -го восстановления.

1. Показатели безотказности.

Среднее время безотказной работы (средняя наработка на отказ) является математическим ожиданием времени безотказной работы

$$T_0 = \int_0^{\infty} tf(t)dt. \quad (2.8)$$

Параметр потока отказов характеризует количество отказов в единицу времени

$$\lambda = 1/ T_0. \quad (2.9)$$

Эта величина аналогична интенсивности отказов.

2. Показатели ремонтпригодности (восстанавливаемости).

Среднее время восстановления определяется как математическое ожидание времени восстановления объекта

$$T_B = \int_0^{\infty} tg(t)dt. \quad (2.10)$$

Случайное время восстановления включает несколько составляющих: время обнаружения и локализации отказа, время определения причины отказа, время устранения отказа и проверки работоспособности после ликвидации отказа.

Интенсивность восстановления объекта в момент времени t , отсчитываемый от начала восстановления, при условии, что до момента времени t восстановление не произошло

$$\mu = 1/T_B. \quad (2.11)$$

Кроме того, ремонтпригодность характеризуется такими показателями как степень приспособленности к проведению ремонтных работ и удобство их выполнения, трудоемкость и потребность в обслуживающем персонале.

3. Комплексные показатели.

Коэффициент готовности объекта соответствует вероятности нахождения объекта в работоспособном состоянии или математическому ожиданию отношения времени, в течение которого объект находится в работоспособном состоянии в некотором интервале времени, ко всей длительности этого интервала. Для любых распределений наработок между отказами и времени восстановления, имеющих конечные средние значения, коэффициент готовности

$$k_T = T_0 / (T_0 + T_B). \quad (2.12)$$

Коэффициент готовности относительно мало информативен, так как его конкретные значения могут быть получены при различных сочетаниях среднего времени наработки на отказ и времени восстановления. Поэтому нормативные документы рекомендуют характеризовать надежность одним из двух способов: заданием величин T_0 и T_B ; заданием коэффициента готовности и одного из показателей T_0 или T_B . Величину $k_{П} = 1 - k_T$ называют коэффициентом простоя.

Коэффициент оперативной готовности объекта характеризует вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени и проработает безотказно в течение заданного периода времени t , начиная с этого момента

$$k_{ог}(t) = \frac{1}{T_0 + T_B} \int_t^{\infty} [1 - F(t)] dt. \quad (2.13)$$

В частном случае, когда функция распределения времени наработки между отказами соответствует экспоненциальному закону, коэффициент оперативной готовности определяется соотношением

$$k_{ог}(t) = k_{г} \exp\{-\lambda t\}. \quad (2.13a)$$

Коэффициент $k_{ог}(t)$ применяют для характеристики систем постоянной готовности, которые призваны обеспечить в произвольный период времени решение некоторой задачи. Примером могут служить системы оповещения о стихийных бедствиях.

Наряду с перечисленными находят применение и другие показатели, отражающие конкретные особенности функционирования изделий, например нестационарный характер процесса наработки между отказами и процесса восстановления.

2.5. Показатели эксплуатационной надежности объектов

В процессе эксплуатации объект может применяться по назначению, подвергаться техническому обслуживанию или текущему ремонту. Эксплуатационные показатели позволяют охарактеризовать надежность с учетом конкретных особенностей эксплуатации, оценить влияние технического обслуживания и ремонта на готовность объекта к работе.

Коэффициент исправности оценивает надежность объекта в условиях, когда восстановление производится с некоторой задержкой, связанной с приездом ремонтной бригады или отправкой изделия в специальную мастерскую. В этих случаях средняя продолжительность ремонта является суммой среднего времени восстановления $T_{в}$ и среднего времени на подготовку к ремонту $T_{орг}$ (доставку объекта в мастерскую и обратно или прибытие ремонтной бригады на объект). Тогда коэффициент исправности

$$k_{и} = T_{о} / (T_{о} + T_{в} + T_{орг}). \quad (2.14)$$

Этот показатель аналогичен коэффициенту готовности, т. е. определяет вероятность застать изделие в исправном состоянии, но определяет ее с учетом реальных условий эксплуатации.

Перерывы в работе возникают не только из-за отказов, но и для проведения технического обслуживания. Работы по техническому обслуживанию не обязательно увеличивают общее время простоя изделия. Наоборот, своевременное и качественное проведение работ по техническому обслуживанию может заметно повысить эффективность применения изделия за счет снижения количества отказов, а значит, и сократить суммарное время ремонта. Эффективность применения изделий с учетом непроизводительных простоев по техническим причинам определяется *коэффициентом технического использования*

$$k_{ти} = T_{р} / (T_{р} + T_{проф} + T_{рем}), \quad (2.14)$$

где $T_{р}$ – общее время исправной работы объекта; $T_{проф}$ – время на проведение технического обслуживания; $T_{рем}$ – время на проведение текущего ремонта за рассматриваемый период эксплуатации.

Коэффициент технического использования показывает, какую долю общего времени эксплуатации изделие исправно и практически применяется по назначению.

Коэффициенты $k_{И}$ и $k_{ТИ}$ близки к единице и не всегда наглядны. Поэтому часто вместо них применяют соответствующие коэффициенты простоя, например коэффициент простоя на техническом обслуживании $k_{П, ПРОФ} = T_{ПРОФ} / (T_P + T_{ПРОФ} + T_{РЕМ})$.