

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

3 ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта. Показатель надежности количественно характеризует, в какой степени объекту присущи определенные свойства надежности.

Уровень надежности технического объекта определяется совокупностью значений нескольких характеристик надежности как его отдельных элементов (деталей, узлов, систем и т.д.), так и объекта в целом. В зависимости от того, сколько свойств надежности характеризуют показатели, различаются единичные и комплексные показатели надежности: **единичные** характеризуют одно из свойств, **комплексные** – не менее двух.

При определении надежности объектов используются две формы представления показателей – вероятностная и статистическая. Вероятностная форма удобнее для аналитических расчетов, статистическая – при экспериментальных исследованиях и испытаниях. Кроме того, одни показатели надежности лучше интерпретируются в вероятностных терминах, другие – в статистических. При экспериментальных исследованиях с ростом числа испытываемых объектов или числа испытаний статистические показатели сходятся в пределе к вероятностным. Поэтому для характеристики основных показателей надежности удобнее пользоваться вероятностными формами, а статистические использовать для практических расчетов при экспериментальных исследованиях.

Определения основных показателей надежности приведены в ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения».

3.1 ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Сложность и часто неопределенность процессов, происходящих в объекте и его элементах, зависимость явлений от большого числа причин (первоначального состояния, особенностей хранения, транспортировки и эксплуатации, технического обслуживания и ремонтов, квалификации обслуживающего персонала и др.) делают задачу точного определения момента отказа объекта практически неразрешимой. Поэтому его безотказность характеризуется вероятностью того или иного состояния.

Основным показателем безотказности является **вероятность безотказной работы $p(t)$** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. В общем случае величина вероятности безотказной работы зависит от наработки объекта и ее конкретное значение должно быть поставлено в соответствие с определенной наработкой или временем эксплуатации объекта. Веро-

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

ятность безотказной работы определяется в предположении, что в начальный момент времени (при нулевой наработке) объект работоспособен: $p(0) = 1$. Очевидно $p(\infty) = 0$.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы может быть получена в результате испытаний на надежность достаточно больших выборок. Способ вычисления зависит от плана испытаний. Для простейшего испытания N объектов до отказа последнего объекта без замен и восстановлений статистическая оценка

$$p^*(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = \frac{N(0) - n(t)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t)}{N(0)}, \quad (3.1)$$

где $N(0)$ и $N(t)$ - число работоспособных объектов при $t=0$ и в момент времени или при наработке t , $n(t)$ - число отказавших объектов за время или наработку t .

В ряде случаев бывает необходимо определять *вероятность безотказной работы в интервале времени (или наработки)* от t_1 до t_2 , представляющую собой условную вероятность того, что объект не откажет в этом интервале, при условии, что он безотказно проработал до его начала:

$$p(t_1, t_2) = \frac{p(t_2)}{p(t_1)}. \quad (3.2)$$

По аналогии с выражением (3.1) статистическая оценка:

$$p^*(t_1, t_2) = \frac{N(t_2)}{N(t_1)} = \frac{N(0) - n(t_2)}{N(0) - n(t_1)}. \quad (3.3)$$

Вероятность отказа $q(t)$ – вероятность того, что в течение заданного времени работы или заданной наработки объект откажет хотя бы один раз. Отказ и работоспособное состояние - противоположные несовместные события, образующие полную совокупность возможных состояний объекта, поэтому в любой момент времени или при любой наработке:

$$p(t) + q(t) = 1. \quad (3.4)$$

Очевидно также, что $q(0) = 0$ и $q(\infty) = 1$.

Время работы объекта до отказа в теории надежности, как правило, считается случайной величиной. Вероятность отказа совпадает с интегральной функцией распределения наработки до отказа $q(t) = F(t)$. Статистическая оценка вероятности отказа за время или наработку t

$$q^* = \frac{N(0) - N(t)}{N(0)} = \frac{n(t)}{N(0)}. \quad (3.5)$$

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа – безразмерные величины, выражаются в долях единицы (иногда – в процентах).

Наработка до отказа – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа. Нарботка до отказа используется для характеристики надежности как восстанавливаемых, так и невосстанавливаемых объектов. *Средняя наработка до отказа t_{cp}* – математическое ожидание наработки до отказа:

$$t_{cp} = M(t) = \int_0^{\infty} [1 - q(t)] dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt = \int_0^{\infty} p(t) dt. \quad (3.6)$$

Статистическая оценка средней наработки до отказа

$$t_{cp}^* = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} t_i, \quad (3.7)$$

где t_i – наработка до отказа i -го объекта.

Наработка между отказами – наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа. Очевидно наработка между отказами характеризует надежность только восстанавливаемых объектов.

Средняя наработка на отказ t_0 – отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки, т.е. наработка, приходящая в среднем на один отказ, в рассматриваемом интервале наработки или определенной продолжительности эксплуатации:

$$t_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (3.8)$$

где n – число отказов, t_i – наработка от окончания $(i-1)$ -го восстановления до i -го отказа:

$$t_i = \int_0^{\infty} [1 - q_i(t)] dt = \int_0^{\infty} [1 - F_i(t)] dt = \int_0^{\infty} p_i(t) dt, \quad (3.9)$$

где $q_i(t)$ и $p_i(t)$ – вероятности отказа и безотказной работы объекта от окончания $(i-1)$ -го восстановления до i -го отказа, $F_i(t)$ – интегральная функция распределения вероятности наработки между $(i-1)$ и i -м отказами.

Статистическая оценка средней наработки на отказ

$$t_0^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i. \quad (3.10)$$

Гамма-процентная наработка до отказа (на отказ) t_γ – наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью $\gamma(\%)$.

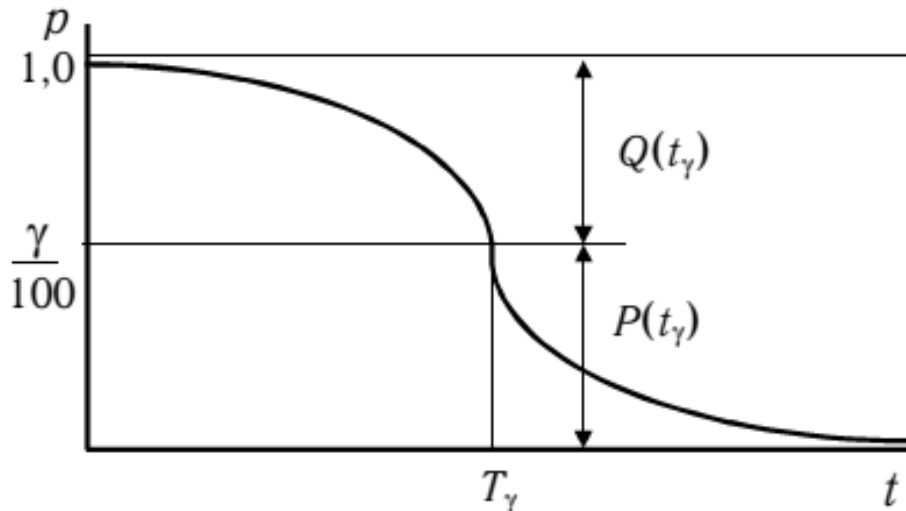


Рис.3.1. Определение значения гамма-процентной наработки.

Значение гамма-процентной наработки можно определить из графика ве-

р
о
я
т

В качестве меры продолжительности безотказной работы может быть выбран любой неубывающий параметр, характеризующий объем эксплуатации. В соответствии с этим все виды наработок могут выражаться в единицах времени или в единицах объема работы объекта (например, единицах количества продукции: для автомобилей естественной единицей измерения может служить пробег в километрах, для прокатных станов – масса прокатанного металла в тоннах и т.д.). Однако с точки зрения теории и общей методологии объективно лучшими и универсальными единицами измерения наработки являются единицы времени.

б
е
з
у
с

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник:

т
к
а
з

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}, \quad (3.11)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа (частота отказов):

н
о
й

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}. \quad (3.12)$$

Очевидно, что

р
а
б

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

$$\lambda(t) = \frac{1}{1-F(t)} \frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{1-q(t)} = -\frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} [\ln p(t)]. \quad (3.13)$$

Тогда вероятность безотказной работы

$$p(t) = 1 - q(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (3.14)$$

Уравнение (3.14) – одно из основных в теории надежности. Из него следует, что вероятность безотказной работы представляет собой экспоненциальную монотонно убывающую функцию, которая в интервале времени или наработки $(0, \infty)$ изменяется от 1 до 0. Соответственно, вероятность отказа в том же интервале изменяется от 0 до 1.

Статистические оценки интенсивности отказов и плотности распределения наработки

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{N(t) - N(t+\Delta t)}{N(t)\Delta t} = \frac{n(t, t+\Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (3.15)$$

$$f^*(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N(0)\Delta t} = \frac{N(t) - N(t+\Delta t)}{N(0)\Delta t} = \frac{n(t, t+\Delta t)}{N(0)\Delta t}. \quad (2.16)$$

Из сравнения формул (3.15) и (3.16) следует, что интенсивность отказов и плотность распределения есть число отказов в единицу времени, отнесенное к числу работоспособных объектов (формула (3.15)) или к общему числу объектов (формула (3.16)).

Параметр потока отказов $\omega(t)$ – отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки:

$$\omega(t) = \frac{dn(t)}{dt}, \quad (3.17)$$

где $n(t)$ – число отказов восстанавливаемого объекта за наработку t . Статистическая оценка параметра потока отказов

$$\omega^* = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{\Delta t}. \quad (3.18)$$

В теории надежности при определении общих закономерностей для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов интенсивность отказов $\lambda(t)$ и параметр потока отказов $\omega(t)$ не различаются, чаще всего используется интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Из формул (3.11), (3.12) и (3.17) следует, что интенсивность отказов $\lambda(t)$, плотность распределения наработки $f(t)$ и параметр потока отказов $\omega(t)$ выражаются в единицах, обратных единицам наработки.

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

Для современных технических объектов средние наработки на отказ составляют тысячи и миллионы часов, что соответствует интенсивности отказов 10^{-3} - 10^{-6} ч⁻¹ и менее. Поэтому если наработка объекта измеряется в часах, то иногда, особенно в зарубежной литературе, для упрощения записей в качестве единицы измерения интенсивности отказов используется внесистемная единица $1 \text{ фит} = 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$.

Функциональные связи между основными показателями безотказности сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Соотношения основных показателей безотказности

Функции	$p(t)$	$q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$p(t)$	–	$1 - p(t)$	$-dp(t)/dt$	$-[dp(t)/dt]/p(t)$
$q(t)$	$1 - q(t)$	–	$dq(t)/dt$	$[dq(t)/dt]/[1-q(t)]$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(t)dt$	$\int_0^t f(t)dt$	–	$f(t) / \int_t^{\infty} f(t)dt$
$\lambda(t)$	$\exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]$	$1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]$	$\lambda(t) \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]$	–

3.2 ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Технический ресурс - наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние. Технический ресурс представляет собой запас возможной наработки объекта. Для неремонтируемых объектов он совпадает с наработкой до отказа. Для ремонтируемых объектов различаются **доремонтный**, **межремонтный**, **послеремонтный** и **полный** (до списания) ресурсы.

Средний ресурс – математическое ожидание технического ресурса. **Гамма-процентный ресурс** – наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью γ (%). При $\gamma = 100$ % гамма-процентный ресурс называется **установленным ресурсом**, при $\gamma = 50$ % – **медианным**. **Назначенный ресурс** – суммарная наработка, при достижении которой применение объекта должно быть прекращено. Кроме того, предприятие-изготовитель или ремонтное предприятие могут установить **гарантийный ресурс**, в течение которого гарантируется выполнение установленных требований к объекту (при соблюдении правил его эксплуатации, хранения и транспортировки).

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

Все виды ресурса измеряются в единицах наработки, чаще всего – в единицах времени.

Срок службы – календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта (или ее возобновления после ремонта определенного вида) до перехода в предельное состояние. Для ремонтируемых объектов различаются *доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный* (до списания) сроки службы.

Средний срок службы $T_{ср}$ – математическое ожидание срока службы. *Гамма-процентный срок службы T_γ* – календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ (%). При $\gamma = 100\%$ гамма-процентный срок службы называется *установленным сроком службы*, при $\gamma = 50\%$ – *медианным*.

Назначенный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта, при достижении которой применение его по назначению должно быть прекращено.

Целью установления назначенного срока или назначенного ресурса является обеспечение заблаговременного прекращения применения объекта исходя из требований безопасности или по экономическим соображениям. После достижения назначенного срока службы или выработки назначенного ресурса объект может быть списан, направлен в ремонт, передан для использования не по назначению, законсервирован для хранения или может быть принято решение о продолжении эксплуатации.

Предприятие-изготовитель или ремонтное предприятие могут установить *гарантийный срок службы* (эксплуатации), в течение которого гарантируется выполнение установленных требований к объекту (при соблюдении правил его эксплуатации, хранения и транспортировки).

Все сроки службы измеряются в единицах календарного времени.

3.3 ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Вероятность восстановления работоспособного состояния $p_v(t)$ – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного. Эта вероятность представляет собой значение интегральной функции распределения времени восстановления. Статическая оценка вероятности восстановления за время t

$$p_v^*(t) = \frac{n(t)}{n(0)}, \quad (3.19)$$

где $n(0)$ – число объектов при $t = 0$, $n(t)$ – число восстановленных объектов за время t .

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

Вероятность восстановления – безразмерная величина. *Время восстановления работоспособного состояния $t_{\text{в}}$* – продолжительность восстановления объекта. *Среднее время восстановления* – математическое ожидание времени восстановления:

$$t_{\text{в}} = \int_0^{\infty} [1 - p_{\text{в}}(t)] dt. \quad (3.20)$$

Статистическая оценка среднего времени восстановления

$$t_{\text{в}}^* = \frac{1}{n(0)} = \sum_{i=1}^{n(0)} t_{\text{в}i}, \quad (3.21)$$

Интенсивность восстановления работоспособного состояния $\mu(t)$ – условная плотность вероятности восстановления объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не произошло:

$$\mu(t) = \frac{f(t_{\text{в}})}{1 - p_{\text{в}}(t)}, \quad (3.22)$$

где $f(t_{\text{в}}) = \frac{dp_{\text{в}}(t)}{dt}$ – плотность распределения времени восстановления. Тогда вероятность восстановления за время t

$$p_{\text{в}}(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \mu(t) dt \right]. \quad (3.23)$$

Статистические оценки интенсивности восстановления и плотности распределения времени восстановления

$$\mu^*(t) = \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{n(t)\Delta t}, \quad f^*(t) = \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{n(0)\Delta t}. \quad (3.24)$$

В теории надежности часто принимается $\mu = \text{const}$. Тогда

$$p_{\text{в}} = 1 - \exp(-\mu t). \quad (3.25)$$

Время восстановления выражаются в единицах времени, интенсивность восстановления и плотность распределения – в единицах, обратных единицам времени.

3.4 ПОКАЗАТЕЛИ СОХРАНЯЕМОСТИ

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение и после которой сохраняются значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в установленных пределах. Различают

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

срок сохраняемости до ввода в эксплуатацию и

срок сохраняемости в период эксплуатации.

Средний срок сохраняемости t_c – математическое ожидание срока сохраняемости.

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ (%). При $\gamma = 100\%$ гамма-процентный срок сохраняемости называется *установленным сроком сохраняемости*, при $\gamma = 50\%$ – *медианным*.

Сроки сохраняемости измеряются в единицах календарного времени.

3.5 КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

При оценке эксплуатационной надежности технических систем широко используются комплексные показатели, характеризующие одновременно несколько свойств надежности (безотказность, ремонтпригодность, долговечность). Наиболее распространенными комплексными показателями являются коэффициенты готовности, оперативной готовности и технического использования.

Коэффициент готовности K_g – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению только в отношении его работоспособности и, следовательно, означает вероятность застать объект в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, причем этот момент не может быть выбран в тех интервалах времени, где применение объекта исключено. Коэффициент определяется как отношение математического ожидания времени нахождения объекта в работоспособном состоянии к сумме математических ожиданий этого времени и времени внеплановых ремонтов:

$$K_g = \frac{t}{t + t_B}, \quad (3.26)$$

где t – средняя наработка на отказ, t_B – среднее время восстановления.

Коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный 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 интервала времени. Коэффициент характеризует надежность объектов, необходимость применения которых возникает в произвольный момент времени, после которого требуется определенная безотказная работа. До этого момента объекты могут находиться в режиме дежурства или

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

выполнять другие функции, возможно возникновение отказов и восстановление работоспособности. Коэффициент оперативной готовности

$$K_{ог} = K_r \times p(t_0, t). \quad (3.27)$$

Здесь t_0 – момент, когда возникает необходимость применения объекта; t – момент, когда его применение прекращается.

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ – отношение математического ожидания интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и ремонтов за тот же период эксплуатации:

$$K_{ти} = \frac{t}{t + t_b + t_{то}}. \quad (3.28)$$

Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии в течение рассматриваемого периода эксплуатации, включая периоды всех видов технического обслуживания и ремонтов.

Коэффициент планируемого применения $K_{п}$ – доля периода эксплуатации, в течение которого объект не должен находиться на плановом техническом обслуживании и ремонте. Коэффициент планируемого применения – отношение заданной продолжительности плановых технических обслуживаний и ремонтов за этот период к его продолжительности.

Коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$ – отношение значения показателя эффективности за определенную продолжительность эксплуатации к его номинальному значению, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода эксплуатации не возникают. Коэффициент характеризует степень влияния отказов объекта на эффективность его применения по назначению. При этом под эффективностью понимается свойство создавать некоторый полезный результат (выходной эффект), характеризующийся соответствующими показателями.

Показатель эффективности – показатель качества, характеризующий выполнение объектом его функций, он может выражаться в единицах объема произведенной продукции или ее качества, единицах наработки. При отсутствии отказов коэффициент сохранения эффективности равен единице, в реальных случаях он определяется с учетом надежности объекта.

3.6 ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность технических объектов существенно сказывается на экономических показателях их эксплуатации: повышение безотказности и долговечности

с одной стороны приводит к увеличению материальных затрат, затрат на проектирование и изготовление, а с другой – к снижению эксплуатационных издержек (рис. 3.2).

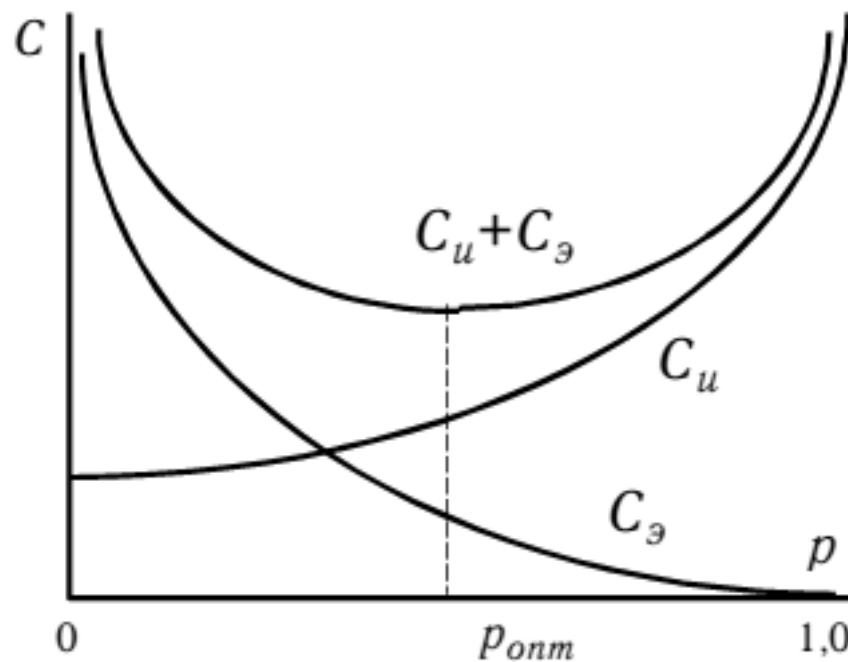


Рис. 3.2. Зависимость капитальных C_u и эксплуатационных $C_э$ затрат от вероятности безотказной работы

Экономический эффект от эксплуатации объекта изменяется во времени под влиянием трех факторов (рис.3.6): затрат на изготовление C_u (включая проектирование, монтаж, отладку и т.д.), эксплуатационных затрат $C_э$ (включая техническое обслуживание, ремонт, профилактические мероприятия и т.д.) и прибыли C_n – полезного эффекта, получаемого от эксплуатации. Первые две величины снижают общий баланс эффективности эксплуатации, третья – увеличивает. Затраты на изготовление не изменяются от момента начала эксплуатации до списания. Эксплуатационные затраты имеют тенденцию к все более быстрому росту из-за процессов старения и износа.

Изменение прибыли во времени, наоборот, имеет тенденцию к уменьшению, поскольку все более частые простои при ремонте и техническом обслуживании снижают производительность объекта.

Поэтому кривая суммарной эффективности

$$C = C_u + C_э + C_n \quad (3.29)$$

имеет максимум C_{max} и дважды пересекает ось времени (рис. 3.3). Продолжительность экономически целесообразного срока эксплуатации лежит между этими двумя точками: сроком окупаемости $T_{ок}$ и предельным $T_{пр}$, после которого эксплуатация объекта убыточна.

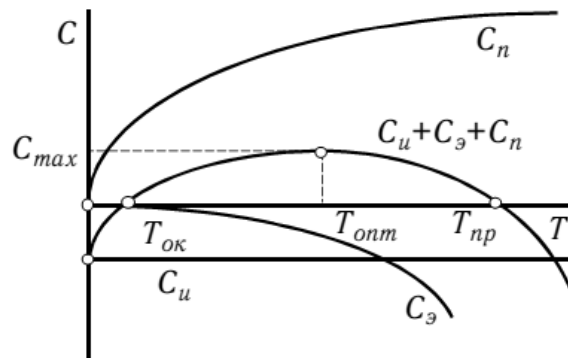


Рис. 3.3. Изменение затрат на изготовление C_u , эксплуатационных затрат $C_э$ и прибыли C_n от времени (срока службы)

Таким образом, показатели надежности связаны с экономическими показателями. Так как экономические показатели характеризуют сразу несколько свойств надежности, то их можно считать комплексными.

Экономическим критерием надежности могут служить *удельные затраты* на изготовление и эксплуатацию:

$$K_э = \frac{C_u + C_э}{T_э}, \quad (3.30)$$

где C_u – стоимость изготовления объекта, $C_э$ – затраты на эксплуатацию, ремонт и обслуживание, $T_э$ – период целесообразной эксплуатации.

Коэффициент эксплуатационных издержек $K_{из}$ характеризует соотношение между стоимостью изготовления и эксплуатации изделия:

$$K_{из} = \frac{C_u}{C_u + C_э}. \quad (3.31)$$

Более высокая надежность объекта обычно достигается за счет дополнительных затрат. Общие затраты на изготовление изделия складываются из постоянных затрат C_k , не зависящих от уровня надежности, и переменной составляющей C_n , обусловленной требованиями надежности:

$$C_u = C_k + C_n. \quad (3.32)$$

Для прогнозирования значения величины C_n , которая часто называется *«ценой надежности»*, обычно используется сравнение с прототипом на основании эмпирических зависимостей вида

$$C_n = C_{n0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^\alpha, \quad (3.33)$$

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

где $C_{н0}$ – цена надежности прототипа (аналога), T и T_0 – наработка на отказ или средний срок службы проектируемого объекта и прототипа, α – эмпирический показатель, характеризующий уровень производства, обычно $\alpha \approx 0,5 \div 1,5$.

Экономические показатели надежности часто позволяют наиболее объективно и комплексно оценить надежность объектов и могут использоваться для ее оптимизации и нормирования.

3.7 НОРМИРУЕМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Для обеспечения высокого уровня надежности и эффективности важное значение имеет выбор номенклатуры нормируемых показателей, которые должны быть включены в нормативно-техническую, эксплуатационную и ремонтную документацию.

В период эксплуатации любой объект должен соответствовать установленным *требованиям по надежности*.

Требования по надежности – совокупность количественных и качественных требований к безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, выполнение которых обеспечивает эксплуатацию объекта с заданными показателями эффективности, безопасности, экологичности, живучести и других составляющих качества, зависящими от надежности, или возможность применения данного изделия в качестве составной части другого изделия с заданным уровнем надежности.

Нормируемый показатель надежности – показатель, который прямо или косвенно входит в общую оценку функционирования объекта в виде некоторой функции полезности или критерия эффективности, он характеризует количественные показатели надежности с учетом степени и характера их влияния на выполнение возложенных на объект функций.

Нормативное значение показателя надежности – значение показателя надежности, установленное в результате задания требований по надежности или нормирования надежности и внесенное в нормативно-техническую документацию.

Процедура установления номенклатуры и количественных значений показателей надежности, а также требований к точности и достоверности определения показателей, исходя из требований по надежности объекта в целом называется *нормированием надежности*.

Номенклатура нормируемых показателей надежности устанавливается для каждого объекта в зависимости от его вида и назначения, с учетом особенностей использования, последствий отказов, принятой системы технического обслуживания и ремонта. Для разных классов и групп объектов наиболее важными могут

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

быть показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности или сохраняемости.

При выборе нормируемых показателей надежности необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

- общее число показателей должно быть минимальным, но они должны характеризовать все этапы эксплуатации объекта;
- единичные показатели предпочтительнее сложных комплексных;
- показатели надежности должны иметь однозначное толкование и простой физический смысл;
- показатели надежности должны допускать возможность статистической оценки при испытаниях или по результатам эксплуатации;
- показатели надежности должны допускать возможность проведения подтверждающих (проверочных) оценок на этапе проектирования;
- показатели надежности должны (по возможности) задаваться количественно.

Показатели надежности, включаемые в проектно-конструкторскую документацию объекта, должны соответствовать режиму его использования и конструкции, при этом должны также учитываться возможные последствия потенциальных отказов и предусмотрена возможность проверки показателей при испытаниях и эксплуатации.

Правильный выбор основных показателей надежности часто определяет общую оценку качества объекта.

Например, на рисунке 3.4 приведены графики изменения вероятности безотказной работы двух однотипных объектов. Если в качестве основного показателя надежности принять вероятность безотказной работы объекта в течение заданной наработки t_0 (или ресурса) или γ -процентную наработку, то более надежным будет считаться первый объект, если в качестве показателя принять среднюю наработку до отказа, то предпочтительнее выглядит второй.

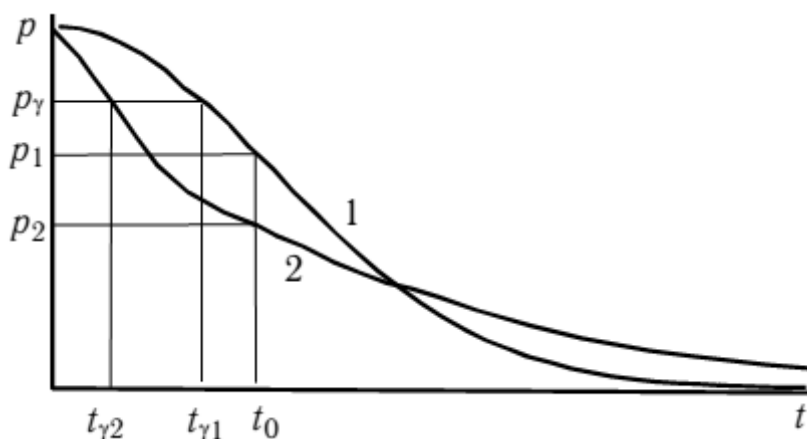


Рис. 3.4. Графики изменения вероятности безотказной работы

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

При выборе нормируемых показателей надежности необходимо исходить из назначения объекта и условий его использования. При этом все объекты можно разделить на три группы:

- объекты, предназначенные для работы в системах, эффективность функционирования которых может быть оценена экономическими критериями;
- объекты, функционирование которых связано с обеспечением безопасности;
- объекты, для которых нельзя заранее определить условия их использования.

Для объектов первой группы выбор показателей надежности определяется режимом их применения. Поэтому на первом этапе необходимо конкретизировать режим применения, отнести объект к одному из классов:

- невосстанавливаемые,
- восстанавливаемые вне процесса применения,
- восстанавливаемые в процессе применения с допустимыми перерывами в работе.
- восстанавливаемые в процессе применения с недопустимыми перерывами в работе.

На втором этапе выбирается тип показателей надежности (табл. 2.2):

- интервальные, относящиеся к заданному интервалу наработки или времени;
- мгновенные, соответствующие заданному значению времени или наработки;
- числовые, не связанные с расположением заданного интервала или момента времени (или наработки).

При этом учитываются и экономические соображения: тип показателя экономической эффективности и его зависимость от режима применения.

Таблица 3.2

ВЫБОР НОРМИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Показатели надежности	Восстанавливаемые		
	вне процесса применения	в процессе применения	
		перерывы допускаются	перерывы не допускаются
Интервальные	$p_{cp}(t, t+\Delta t), p_{cp}(t_1, t_2)$	–	$p_{cp}(t_1, t_2)$
Мгновенные	$\omega(t)$	$K_{oz}(t)$	$\omega(t)$
Числовые	t_{cp}, ω_{cp}	t_{cp}, t_s, K_z	t_{cp}, ω_{cp}

В таблице обозначены: t_{cp} – средняя наработка до отказа, t_p – средний ресурс, t_s – среднее время восстановления, $p(t), p(t_1, t_2), p_{cp}(t+\Delta t)$ – вероятность безотказной работы за время или наработку t , в интервале от t_1 до t_2 , на отрезке Δt , $\omega(t)$ – параметр потока отказов, K_z – коэффициент готовности, K_{oz} – коэффициент оперативной готовности.

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

Например (табл.3.1), для объектов, восстанавливаемых в процессе применения, у которых допустимы перерывы в работе, в качестве основных показателей надежности часто используются средняя наработка на отказ, среднее время восстановления или их сочетания (например, коэффициент готовности), для объектов, у которых перерывы в работе недопустимы, – вероятность безотказной работы в течение заданного времени.

При построении моделей режимов применения и выборе нормируемых показателей надежности учитываются также принцип действия и режим работы системы контроля работоспособности объекта, так как при непрерывном или достаточно частом контроле возникающие отказы сразу обнаруживаются и быстро принимаются меры к восстановлению работоспособности.

Для обоснованного выбора номенклатуры нормируемых показателей надежности из условий безопасности (табл.3.3) выделяются основные факторы, влияющие на показатели безопасности, с учетом процессов, происходящих после появления отказов.

Таблица 3.3

Нормируемые показатели надежности с учетом требований безопасности

Тип объекта	Показатели надежности, учитывающие требования безопасности
1. С компенсацией последствий отказов	$p(t, t + \Delta t)$
2. С допустимыми остановками	$p(t, t + \Delta t), K_z, p_s$
3. С аварийными отказами	$p(t, t + \Delta t)$
4. Без компенсации последствий отказов	$p(t)$

Для третьей группы объектов в качестве основных показателей целесообразнее всего назначить любую полную характеристику надежности: для восстанавливаемых объектов – функцию вероятности безотказной работы $p(t)$ или плотность распределения наработки до отказа $f(t)$, или интенсивность отказов $\lambda(t)$; для объектов, восстанавливаемых вне процесса применения - вероятность безотказной работы в течение заданного интервала времени $p(t_1, t_2)$ или параметр потока отказов $\omega(t)$; для объектов, восстанавливаемых в процессе применения если перерывы в работе допустимы, – коэффициент оперативной готовности $K_{op}(t)$; для объектов, восстанавливаемых в процессе применения, если перерывы в работе не допускаются, – вероятность безотказной работы в течение интервала времени $p(t_1, t_2)$.

Конкретные выражения для определения показателей безотказности зависят от вида законов распределения наработки до отказа. Наиболее широкое применение в теории и практике надежности нашли экспоненциальное, нормальное и логарифмически-нормальное распределения, распределение Вейбулла и гамма-распределение. Если известен вид распределения времени безотказной работы или наработки до отказа, рекомендуется задавать следующие показатели

Безопасность и надежность технических систем	Лекция 3. Показатели надёжности
--	---------------------------------

надежности: при однопараметрическом (экспоненциальном) распределении – интенсивность отказов λ (или параметр потока отказов ω), среднюю наработку до отказа t_{cp} (или на отказ t_0), вероятность безотказной работы в течение заданного интервала времени (или наработки) $p(t_1, t_2)$; при двухпараметрическом законе распределения (нормальном, логарифмически нормальном, Вейбулла и др.) – два параметра, характеризующих распределение (например, для нормального распределения – среднюю наработку и дисперсию или среднее квадратическое отклонение).

В каждом конкретном случае вопрос об определении номенклатуры нормируемых показателей надежности приходится решать индивидуально, однако для большинства технических объектов при их использовании в установившемся режиме в качестве основных нормируемых показателей надежности можно использовать один из следующих показателей: интенсивность или параметр потока отказов, среднюю или γ -процентную наработку, вероятность безотказной работы в течение заданного времени, коэффициент готовности, среднее или γ -процентное время восстановления. В сложных случаях можно задавать два и более показателей надежности.

Номенклатура нормируемых показателей надежности для многих видов технических объектов приведена в государственных и отраслевых стандартах, технических условиях и других нормативно-технических документах. Например, в качестве основных показателей для химического оборудования установлены наработка на отказ, установленный ресурс до капитального ремонта и установленный срок службы.

В соответствии с ГОСТ 27.003-2016 номенклатура показателей надежности выбирается на основе следующих основных классификационных признаков: определенность назначения изделия (общего или конкретного назначения); число возможных (учитываемых) состояний по работоспособности при эксплуатации (наличие частично неработоспособных состояний); режим применения или функционирования; возможные последствия отказов или достижения предельного состояния при применении или хранении и транспортировании; возможность восстановления; характер процессов, определяющих переход в предельное состояние; возможность и способ восстановления ресурса или срока службы; возможность и необходимость технического обслуживания; возможность и необходимость контроля перед применением; наличие в составе средств вычислительной техники.