

НАДЁЖНОСТЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ (Часть 1)

1. Основные понятия и определения теории надёжности
2. Отказы. Модели отказов
3. Аналитические методы анализа надёжности систем
4. Статистический анализ показателей надёжности элементов и систем
5. Имитационное моделирование надёжности систем

1.3 Основные показатели надежности, их взаимосвязь

1.3.1 Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов

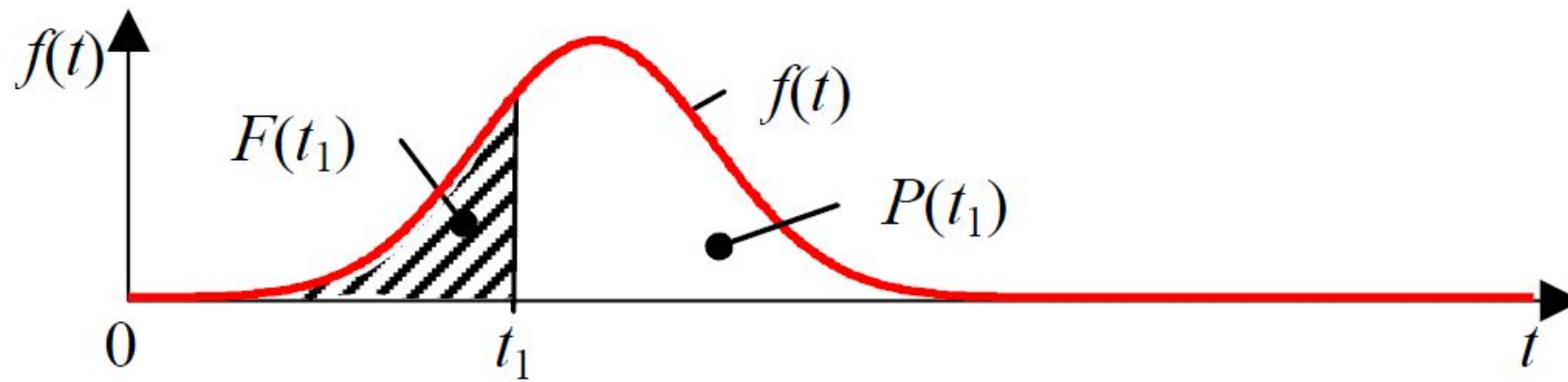
Вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки $t > 0$ отказ объекта не

вози

$$P(t) = P(\xi > t) = 1 - P(\xi \leq t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x) dx, \quad (1.1)$$

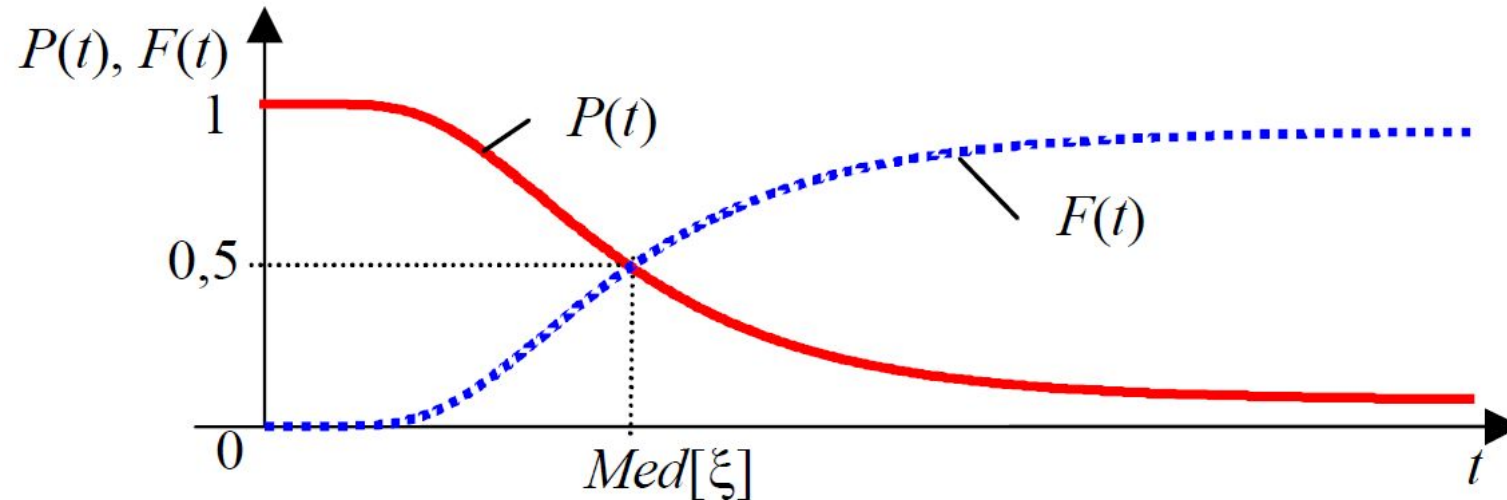
где ξ – наработка объекта до отказа; $F(t)$ – вероятность отказа в течение заданной наработки t (функция распределения случайной величины ξ); $f(x)$ – функция плотности распределения случайной величины ξ .

Из формулы (1.1) следует, что вероятность отказа $F(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$ равны площадям криволинейных трапеций, ограниченных функцией плотности распределения $f(t)$ и осью абсцисс на интервалах $[0, t]$ и (t, ∞) соответственно.



Графическая интерпретация вероятности безотказной работы и вероятности отказа

С ростом наработки вероятность безотказной работы невосстанавливаемого объекта $P(t)$ монотонно уменьшается от 1 при $t = 0$, асимптотически приближаясь к 0 при $t \rightarrow \infty$, а вероятность отказа $F(t)$ возрастает от 0 до 1.



*Зависимость вероятности безотказной работы
и вероятности отказа объекта от наработки*

Вероятность безотказной работы объекта в интервале наработки $(t, t + \Delta t)$ есть условная вероятность $P(t, t + \Delta t)$ того, что на этом интервале наработки отказ объекта не наступит, определяемая при условии, что объект сохранил работоспособность к началу этого интервала t :

$$P(t, t + \Delta t) = P(\xi > t + \Delta t | \xi > t) = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)} = \frac{\int_{t+\Delta t}^{\infty} f(x) dx}{\int_t^{\infty} f(x) dx}, \quad (1.2)$$

где $P(t + \Delta t)$ – вероятность безотказной работы объекта на интервале наработки $(0, t + \Delta t)$; $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта на интервале наработки $(0, t)$.

Средняя наработка до отказа t – математическое ожидание наработки объекта до отказа:

$$\bar{t} = M[\xi] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (1.3)$$

Средняя наработка до отказа равна площади криволинейной трапеции, ограниченной функцией вероятности безотказной работы $P(t)$ от наработки объекта и осью абсцисс.

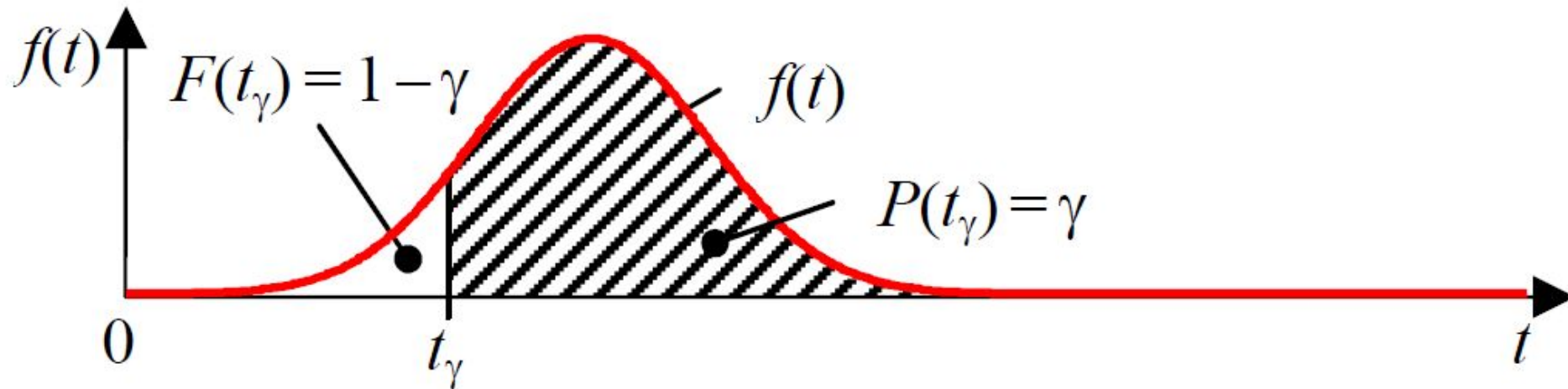
Гамма-процентная наработка до отказа t_γ – наработка до отказа, которая обеспечивается для $\gamma \cdot 100$ % объектов рассматриваемого типа.

$$P(t_\gamma) = \int_{t_\gamma}^{\infty} f(t) dt = \gamma \quad (1.4)$$

Вероятность отказа (функция распределения случайной величины ξ – наработки объекта до отказа) в течение наработки t_γ составляет:

$$F(t_\gamma) = 1 - P(t_\gamma) = \int_0^{t_\gamma} f(t) dt = 1 - \gamma \quad (1.5)$$

Т. е. гамма-процентная наработка до отказа есть квантиль распределения случайной величины ξ уровня $(1 - \gamma)$; соответственно $(1 - \gamma) \gamma \cdot 100$ % есть процент объектов, для которых отказы в течение наработки t_γ в среднем имеют место.



Графическая интерпретация гамма-процентной наработки до отказа

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ в момент наработки t – предел отношения вероятности отказа объекта в полуинтервале наработки $(t, t + \Delta t]$ при условии, что к моменту t отказ еще не наступил, к величине интервала Δt при его стремлении к нулю, т. е.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < \xi \leq t + \Delta t \mid \xi > t)}{\Delta t} \quad (1.6)$$

Преобразуем выражение (1.6), применяя к условной вероятности в числителе теорему умножения для зависимых событий

$\{t < \xi \leq t + \Delta t\}$ и $\{\xi > t\}$:

$$\begin{aligned} P(t < \xi \leq t + \Delta t \mid \xi > t) &= \frac{P(\{t < \xi \leq t + \Delta t\} \cap \{\xi > t\})}{P(\xi > t)} = \\ &= \frac{P(t < \xi \leq t + \Delta t)}{P(\xi > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{P(\xi > t)} \end{aligned}$$

Подставляя полученное выражение в формулу (1.6), получим

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{P(\xi > t) \Delta t} = \frac{1}{P(\xi > t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t}$$

Выражая вероятность $P(\xi > t)$ через функцию распределения $F(t)$ наработки объекта до отказа ξ ,

$$P(\xi > t) = 1 - P(\xi \leq t) = 1 - F(t),$$

и, учитывая взаимосвязь функции распределения $F(t)$ и функции плотности распределения $f(t)$ наработки до отказа ξ

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = F'(t) = f(t)$$

получим следующее выражение для интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = \frac{1}{P(\xi > t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (1.7)$$

Несложно показать, что

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1 - P(t))}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} \quad (1.8)$$

Следовательно,

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} [\ln P(t)] \quad (1.9)$$

Умножая обе части этого равенства на $(-dt)$ и интегрируя в пределах от 0 до t , получаем

$$-\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t d[\ln P(t)] = \ln P(t) \Big|_0^t = \ln P(t) - \ln P(0) = \ln P(t) - \ln(1) = \ln P(t)$$

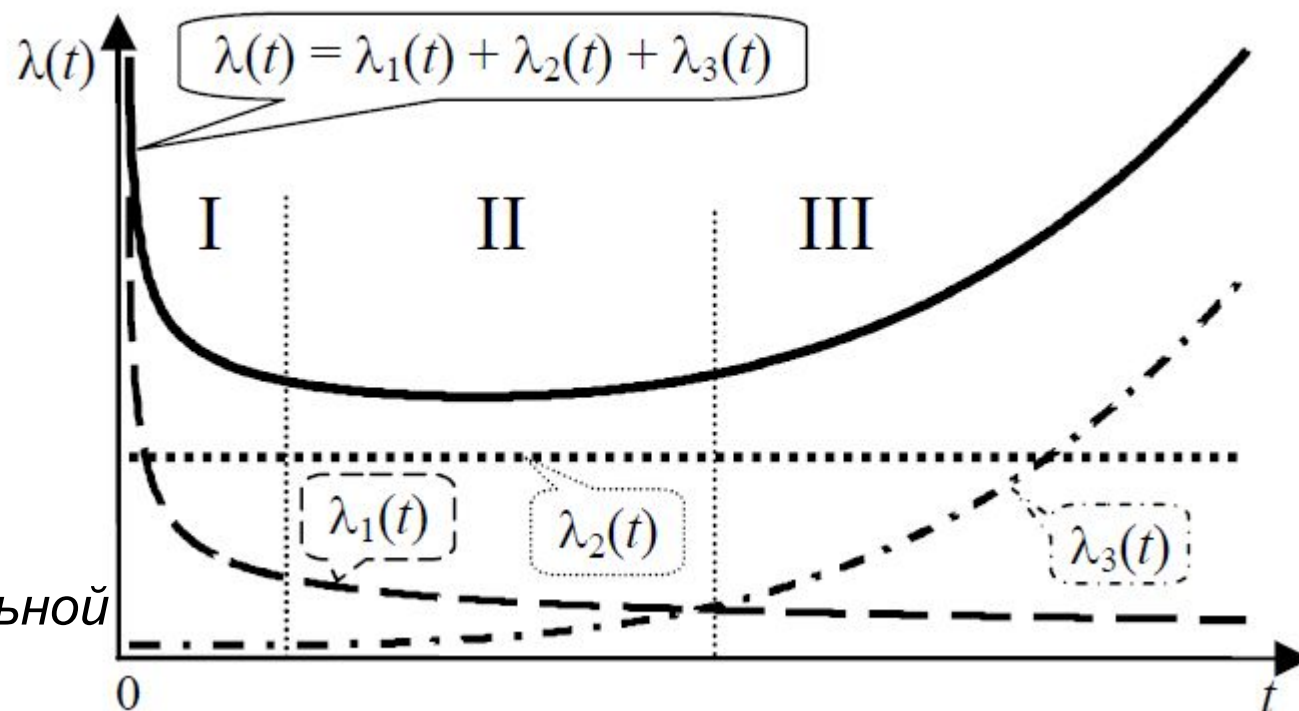
Потенцируя последнее равенство, получаем выражение, которое называют **основной формулой надежности**:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) \quad (1.10)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ невосстанавливаемых технических объектов, как правило, определяется суммой интенсивности отказов объекта вследствие наличия скрытых дефектов изготовления $\lambda_1(t)$, интенсивности внезапных отказов объекта $\lambda_2(t)$ и интенсивности износных и деградационных отказов $\lambda_3(t)$.

На этой кривой $\lambda(t)$ выделяют три характерных участка: период приработк
период нормальной
эксплуатации и период
старения.

I – период приработки; II – период нормальной эксплуатации; III – период старения



Начальный период эксплуатации (период приработки)

Повышенный уровень интенсивности отказов на этом участке объясняется наличием скрытых дефектов изготовления, которые проявляются в начальный период эксплуатации объекта. Функция интенсивности отказов объектов вследствие наличия скрытых дефектов изготовления представлена на рисунке кривой $\lambda_1(t)$.

Контроль качества материалов и элементов, приработочные испытания и другие специальные мероприятия позволяют существенно уменьшить интенсивность отказов системы в этот период. Поэтому обычно в расчетах надежности данный период игнорируется.

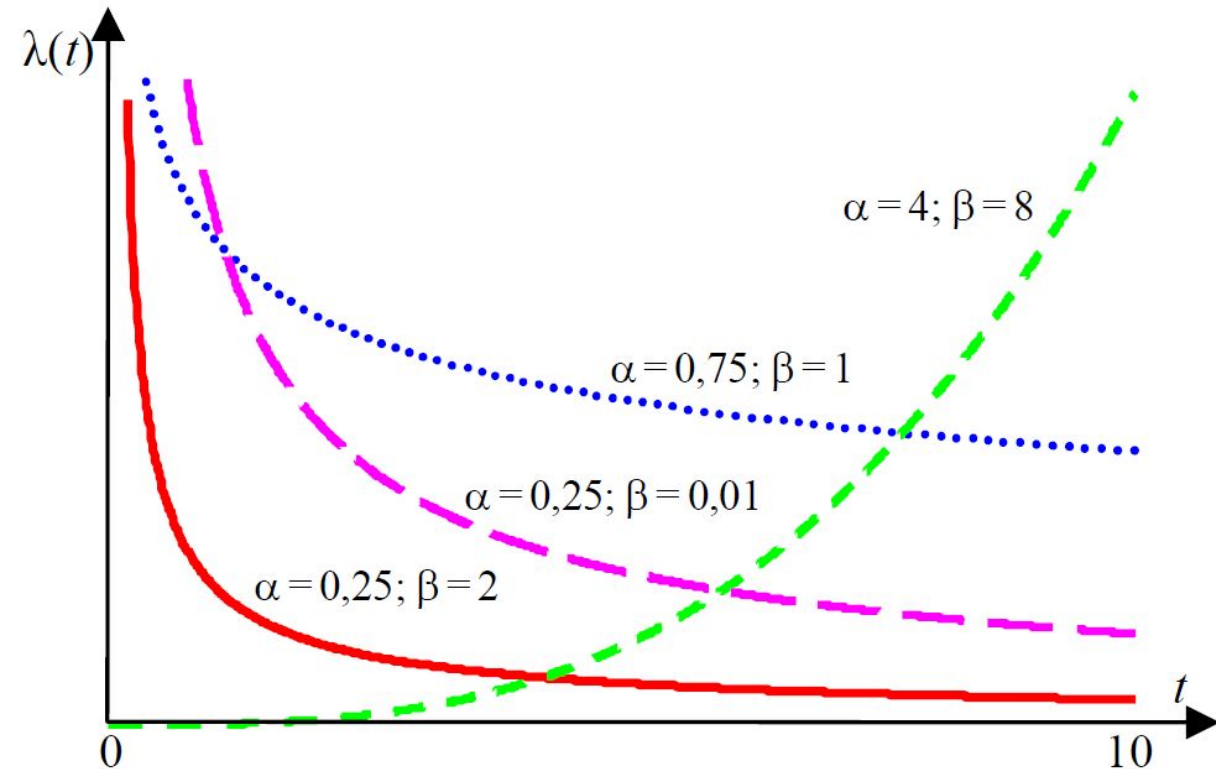
Пример 1.1. Допустим, интенсивность отказов объекта описывается степенной функцией вида

$$\lambda(t) = \alpha \beta^{-\alpha} t^{\alpha-1} \quad (1.11)$$

Тогда, в соответствии с основной формулой надежности (1.10) и выражением (1.7)

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \frac{\alpha x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} dx\right) = \exp\left(-\frac{\alpha}{\beta^\alpha} \frac{t^\alpha}{\alpha}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (1.12)$$

$$f(t) = \lambda(t)P(t) = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (1.13)$$

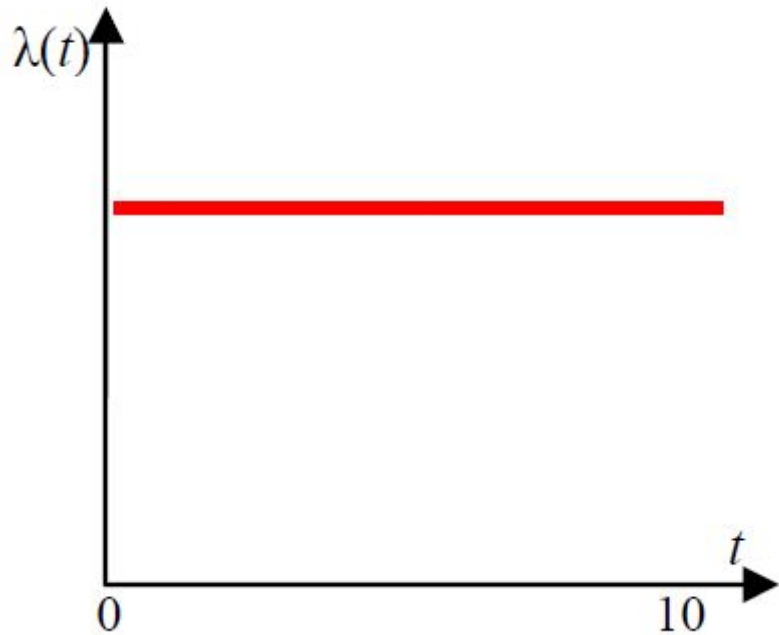


Таким образом, при условии (1.11) наработка объекта до отказа подчиняется распределению Вейбулла

Период нормальной эксплуатации

В течение этого периода, когда уровень накопленных износных повреждений еще не настолько высок, чтобы вызвать ухудшение выходных качественных параметров объекта, интенсивность отказов обычно имеет стабильно низкое значение, уровень которого определяется особенностями вида объекта, его исходным качеством, режимами и условиями эксплуатации. Обычно на этом периоде эксплуатации наблюдается несколько характерных для объекта видов внезапных отказов (поломки деталей предохранительных устройств и т. п.), которые в совокупности определяют уровень интенсивности отказов на этом участке. Функция интенсивности отказов объектов вследствие внезапных отказов представлена на рисунке кривой $\lambda_2(t)$.

Пример 1.2. В частном случае, при $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ в соответствии с (1.10) наработка объекта до отказа подчиняется **экспоненциальному закону распределения**, который широко используется для моделирования внезапных отказов



$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) = \exp\left(-\int_0^t \lambda dt\right) = e^{-\lambda t} \quad (1.14)$$

$$F(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1.15)$$

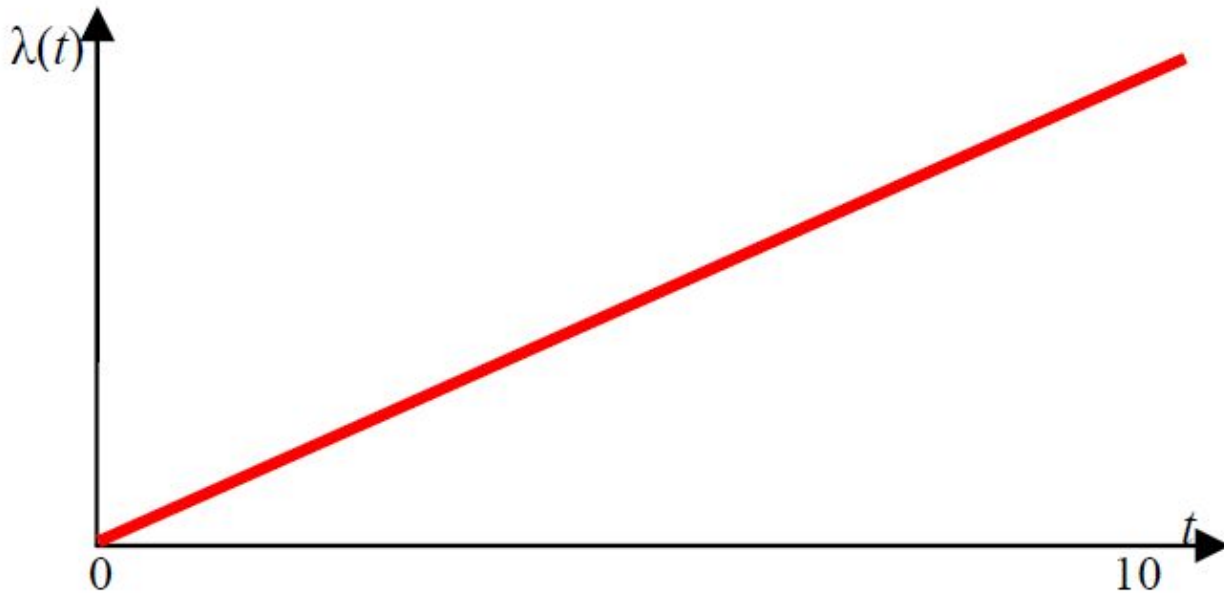
$$f(t) = \lambda(t)P(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1.16)$$

Заключительный период эксплуатации (период старения)

В течение этого периода эксплуатации происходит прогрессивное ухудшение выходных параметров объекта, вызванное накопленными износными и деградационными повреждениями, что вызывает монотонное возрастание интенсивности отказов. Функция интенсивности отказов объектов вследствие износных отказов представлена на рисунке кривой $\lambda_3(t)$.

Пример 1.3. Пусть интенсивность отказов может быть описана линейно возрастающей функцией вида

$$\lambda(t) = ct \quad (1.17)$$



Таким образом, при условии (1.17), наработка объекта до отказа имеет **распределение**

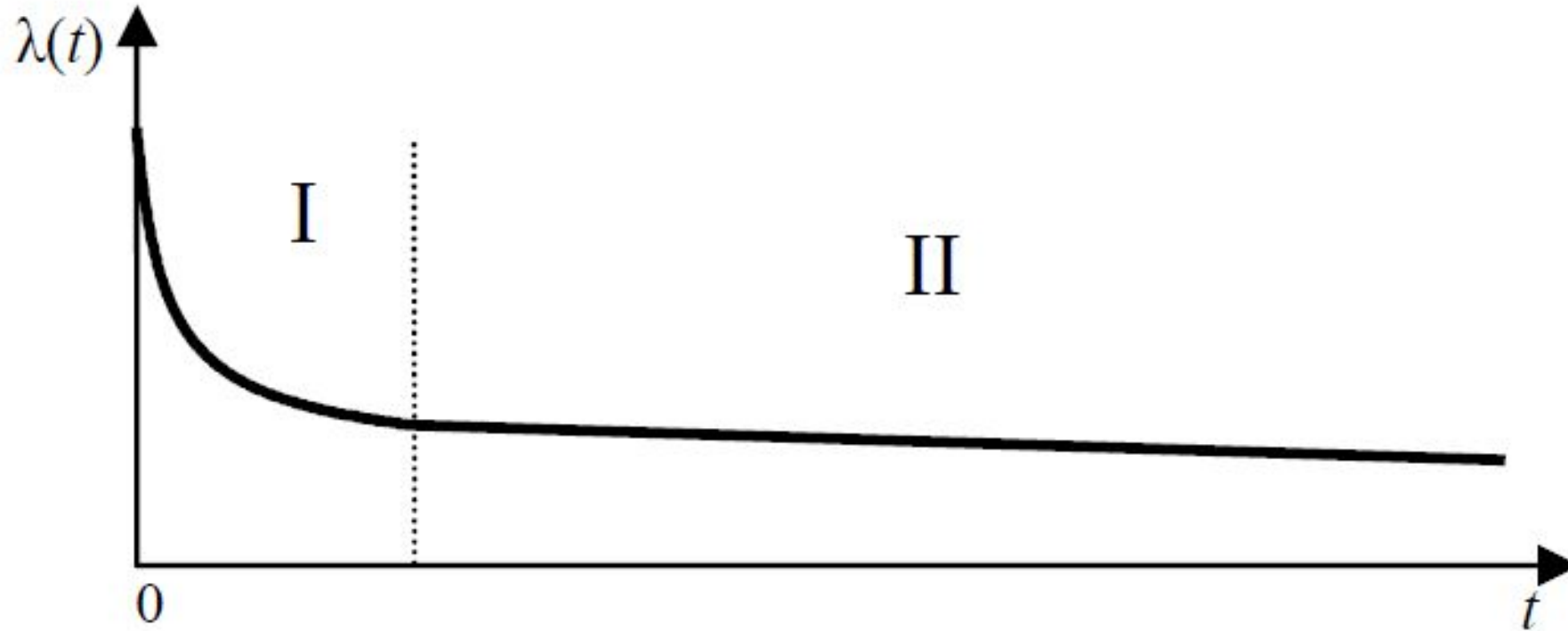
Рэля

Тогда в соответствии с основной формулой надежности (1.10) и выражением (1.7)

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t c t dt\right) = \exp\left(-\frac{ct^2}{2}\right) \quad (1.18)$$

$$f(t) = \lambda(t)P(t) = ct \cdot \exp\left(-\frac{ct^2}{2}\right) \quad (1.19)$$

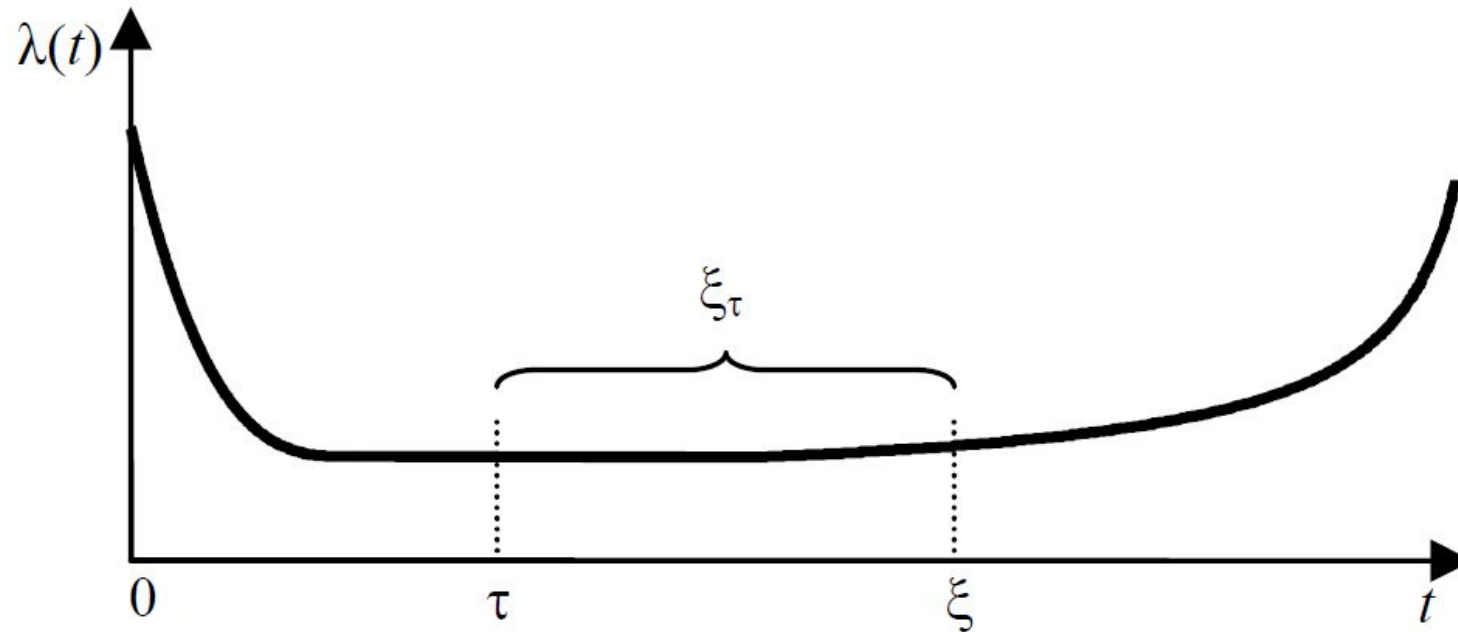
Типичная кривая функции интенсивности отказов $\lambda(t)$ организационных систем и программного обеспечения ЭВМ приведена на рисунке:



I – период приработки; II – нормальной эксплуатации

Важной характеристикой обслуживаемых объектов является **остаточная наработка до отказа** ξ_τ – наработка объекта от момента контроля технического состояния τ до момента отказа ξ :

$$\xi = \tau + \xi_\tau \quad (\text{при условии } \{\xi > \tau\}) \quad (1.20)$$



Вероятность безотказной работы объекта, определяемая по его остаточной наработке, отсчитываемой с момента контроля технического состояния объекта t ,

$$P_{\tau}(t) = P(\xi_{\tau} > t | \xi > \tau) = P(\xi > \tau + t | \xi > \tau) \quad (1.21)$$

где условие $\{\xi > \tau\}$ указывает на то, что в момент контроля объект находился в работоспособном состоянии.

В соответствии с выражениями (1.2) и (1.10) получаем

$$P_{\tau}(t) = P(\xi > \tau + t | \xi > \tau) = \frac{P(\tau + t)}{P(\tau)} = \quad (1.22)$$

$$= \exp\left(-\int_0^{\tau+t} \lambda(z) dz\right) / \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda(z) dz\right) = \exp\left(-\int_{\tau}^{\tau+t} \lambda(z) dz\right)$$

из чего следует, что вероятность безотказной работы объекта, определяемая по его остаточной наработке, не зависит от интенсивности отказов объекта на интервале $(0, \tau)$, т. е. до момента контроля технического состояния объекта.

Функция плотности распределения **остаточной наработки** до отказа $f_{\tau}(t)$ (случайной величины ξ_{τ}) определяется в соответствии с (1.8) выражением

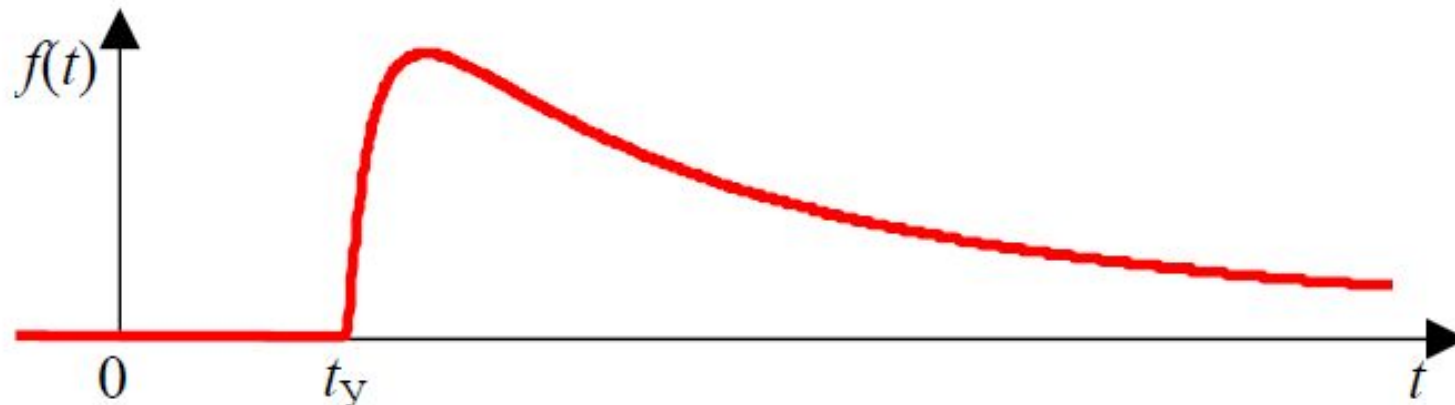
$$\begin{aligned} f_{\tau}(t) &= -\frac{dP_{\tau}(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[\frac{P(\tau+t)}{P(\tau)} \right] = -\frac{1}{P(\tau)} \frac{dP(\tau+t)}{dt} = \left| \begin{array}{l} u = \tau + t \\ du = dt \end{array} \right| = \\ &= -\frac{1}{P(\tau)} \frac{dP(u)}{du} = \frac{f(u)}{P(\tau)} = \frac{f(\tau+t)}{P(\tau)} \quad (1.23) \end{aligned}$$

где f – функция плотности распределения наработки объекта до отказа.

Средняя остаточная наработка до отказа – математическое ожидание величины ξ_τ

$$M[\xi_\tau] = \int_0^\infty t f_\tau(t) dt = \int_0^\infty t \frac{f(\tau+t)}{P(\tau)} dt = \frac{1}{P(\tau)} \int_0^\infty t f(\tau+t) dt \quad (1.24)$$

Установленная наработка до отказа t_y – наработка объекта, в течение которой отказ объекта считается невозможным событием. Данный показатель предполагает, что $f(t) = 0$ при $t < t_y$



Для оценки безотказности высоконадежных объектов, подверженных параметрическим отказам, когда основные показатели малоинформативны (например, вероятность безотказной работы $P(t) \approx 1$), может использоваться **запас надежности объекта** K_H

$$K_H = \frac{X_{\max}}{X_{\text{ex}}} \quad (1.25)$$

где X_{\max} – максимально допустимое значение выходного параметра X объекта (например, износа), соответствующее наступлению отказа; X_{ex} – наибольшее эксплуатационное значение выходного параметра X по всей совокупности объектов рассматриваемого типа.

На интервале наработки $(0, t_y)$ запас надежности объекта $K_H > 1$; при наработке $t \geq t_y$ запас надежности объекта считается исчерпанным ($K_H \leq 1$), а отказы физически возможны.

1.3.2 Показатели безотказности восстанавливаемых объектов

Для характеристики **безотказности восстанавливаемых объектов** при рассмотрении периода до первого отказа или между двумя последовательными отказами могут использоваться те же показатели, что и для невосстанавливаемых объектов.

Средняя наработка на отказ $T(t)$ – отношение суммарной наработки t восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его от

$$T(t) = \frac{t}{M[r(t)]} \quad (1.26)$$

где t – суммарная наработка объекта; $r(t)$ – число отказов объекта, наступивших в течение суммарной наработки t .

Математическое ожидание числа отказов восстанавливаемого объекта в течение суммарной наработки t также называют ведущей функцией потока отказов:

$$\Omega(t) = M[r(t)] \quad (1.27)$$

Параметр потока отказов $\omega(t)$ – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки.

Иными словами, параметр потока отказов есть производная по наработке от ведущей функции потока отказов:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t) - r(t)]}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t} = \Omega'(t) \quad (1.28)$$

В свою очередь, ведущая функция потока отказов может быть выражена через параметр потока отказов:

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(t) dt \quad (1.29)$$

Математическое ожидание числа отказов объекта на интервале наработки (t_1, t_2) :

$$M[r(t_2) - r(t_1)] = M[r(t_2)] - M[r(t_1)] = \Omega(t_2) - \Omega(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt \quad (1.30)$$

Осредненный параметр потока отказов $\omega(t_1, t_2)$ – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой

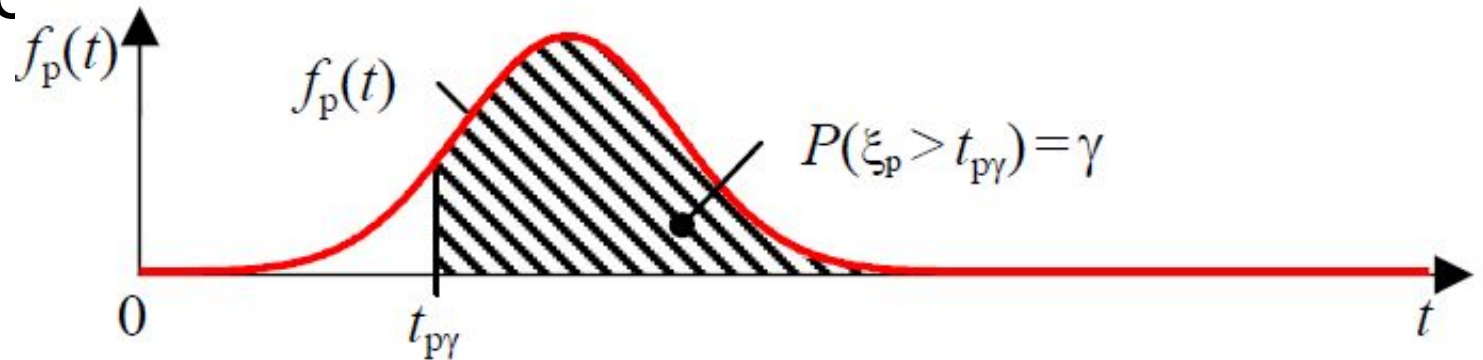
$$\omega(t_1, t_2) = \frac{M[r(t_2) - r(t_1)]}{t_2 - t_1} \quad (1.31)$$

1.3.3 Показатели долговечности

Гамма-процентный ресурс $t_{p\gamma}$ – наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах

$$\int_{t_{p\gamma}}^{\infty} f_p(t) dt = \gamma \quad (1.32)$$

где $f_p(t)$ – функция плотности распределения случайной величины ξ_p – ресурса с \bar{c}



Средний ресурс \bar{t}_p – математическое ожидание ресурса объекта:

$$\bar{t}_p = M[\xi_p] = \int_0^{\infty} t f_p(t) dt \quad (1.33)$$

Гамма-процентный срок службы $t_{c\gamma}$ – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах:

$$\int_{t_{c\gamma}}^{\infty} f_c(t) dt = \gamma \quad (1.34)$$

где $f_c(t)$ – функция плотности распределения случайной величины ξ_p – срока службы объекта.

Средний срок службы \bar{t}_c – математическое ожидание срока службы объекта:

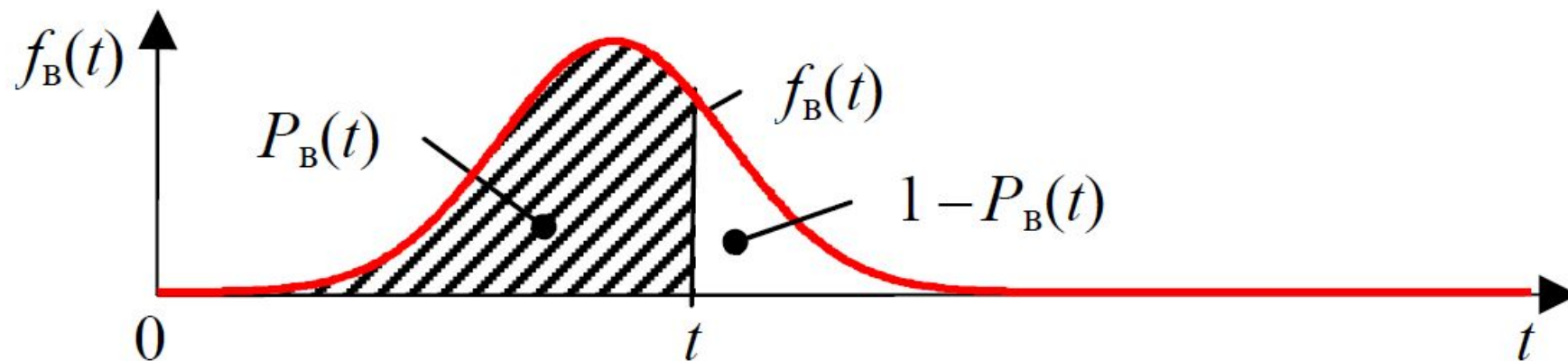
$$\bar{t}_c = M[\xi_c] = \int_0^{\infty} t f_c(t) dt \quad (1.35)$$

1.3.4 Показатели ремонтпригодности

Вероятность восстановления $P_B(t)$ – вероятность того, что время восстановления объекта не превысит заданное значение t :

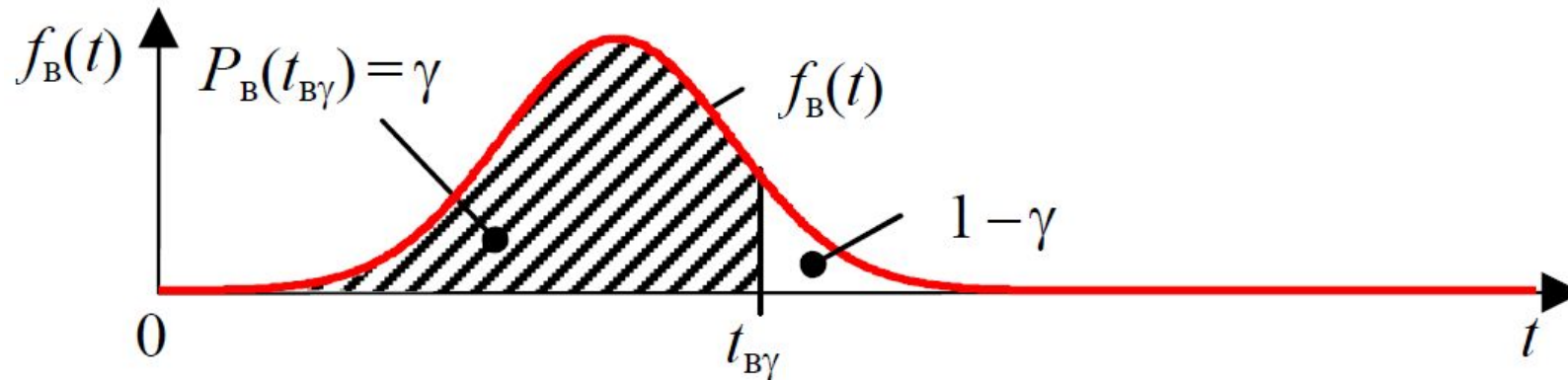
$$P_B(t) = P(\xi_B \leq t) = \int_0^t f_B(t) dt \quad (1.36)$$

где $f_B(t)$ – функция плотности распределения случайной величины ξ_B – времени восстановления работоспособного состояния объекта.



Гамма-процентное время восстановления $t_{B\gamma}$ – время, необходимое для восстановления объекта с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах:

$$P_B(t_{B\gamma}) = P(\xi_B \leq t_{B\gamma}) = \int_0^{t_{B\gamma}} f_B(t) dt = \gamma \quad (1.37)$$



Среднее время восстановления \bar{t}_B – математическое ожидание времени восстановления работоспособности объекта:

$$\bar{t}_B = M[\xi_B] = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt \quad (1.38)$$

Интенсивность восстановления $\mu(t)$ – предел отношения вероятности восстановления работоспособного состояния объекта в полуинтервале времени $(t, t + \Delta t]$ при условии, что к моменту t восстановление еще не завершено, к величине интервала Δt при его стремлении к нулю, т. е.

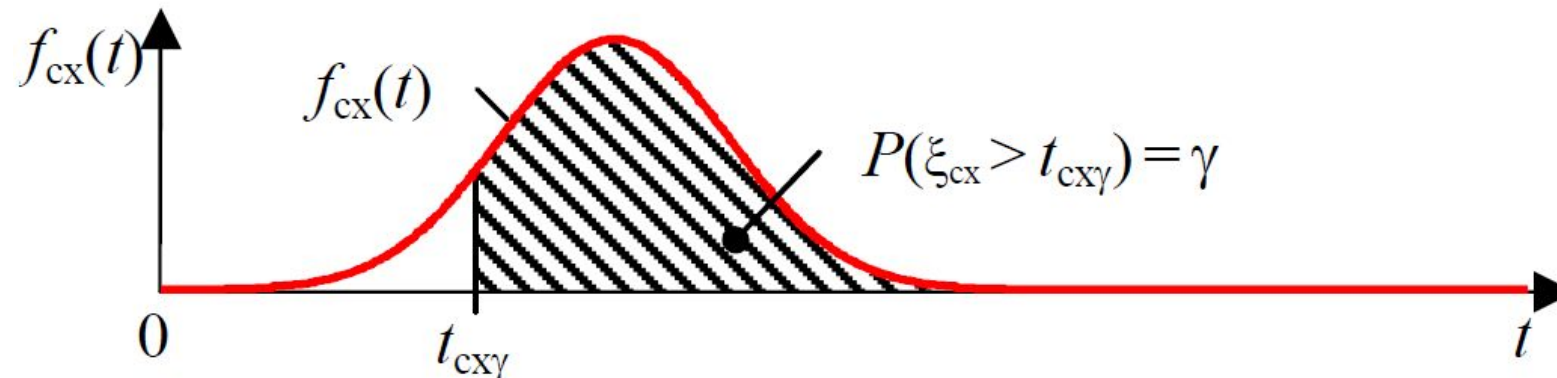
$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < \xi_B \leq t + \Delta t \mid \xi_B > t)}{\Delta t} = \frac{f_B(t)}{1 - P_B(t)} \quad (1.39)$$

1.3.5 Показатели сохраняемости

Гамма-процентный срок сохраняемости $t_{сх\gamma}$ – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах

$$\int_{t_{сх}}^{\infty} f_{сх}(t) dt = \gamma \quad (1.40)$$

где $f_{сх}(t)$ – функция плотности распределения случайной величины $\xi_{сх}$ – срока сохраняемости объекта.



Средний срок сохраняемости $\overline{t_{\text{сх}}}$ – математическое ожидание срока сохраняемости:

$$\overline{t_{\text{сх}}} = M[\xi_{\text{сх}}] = \int_0^{\infty} t f_{\text{сх}}(t) dt \quad (1.41)$$

Назначенный срок хранения – срок хранения, по достижении которого хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

1.3.6 Комплексные показатели надежности

Коэффициент готовности $K_r(t)$ – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t , кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается (например, профилактика, техническое обслуживание, ожидание использования по назначению и т. д.).

Коэффициент готовности является комплексным показателем надежности, отражающим свойства безотказности и ремонтпригодности. Низкие значения $K_r(t)$ свидетельствуют о том, что мероприятия по техническому обслуживанию не полностью выполняют свою роль.

Значение коэффициента готовности для стационарного процесса функционирования объектов (когда $K_r(t) = K_r$, т. е. не изменяется во времени) можно определить из выражения:

$$K_r = \frac{T}{T + \bar{t}_B} \quad (1.42)$$

где T – средняя наработка на отказ восстанавливаемого объекта, определяемая выражением (1.26); \bar{t}_B – среднее время восстановления, определяемое выражением (1.38).

Коэффициент оперативной готовности $K_{ог}(t, t + \Delta t)$ – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t , 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 $(t, t + \Delta t)$.

Показатель определяется выражением:

$$K_{ог}(t, t + \Delta t) = K_{г}(t) P(t, t + \Delta t) \quad (1.43)$$

где $K_{ог}(t)$ – значение коэффициента готовности объекта в момент времени t ; $P(t, t + \Delta t)$ – вероятность безотказной работы объекта в интервале наработки $(t, t + \Delta t)$, определяемая выражением (1.2).

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность объекта, необходимость в применении которого возникает в

Коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$ – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период (при этом не учитываются простои по организационным причинам).

Он характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации и обычно оценивается за длительный период эксплуатации (от начала эксплуатации до капитального ремонта, между капитальными ремонтами, за весь период эксплуатации).

Коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}}} \quad (1.44)$$

где $T_{\text{раб}}$ – суммарное время пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый длительный период эксплуатации; $T_{\text{рем}}$ – суммарное время восстановлений, ремонтов и технического обслуживания за этот же период эксплуатации.

Коэффициент технического использования можно рассматривать как вероятность того, что в данный, произвольно взятый момент времени, объект работоспособен, а не находится в ремонте.

2. Отказы. Модели отказов

2.1 ИСТОЧНИКИ И ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ ОБЪЕКТОВ

2.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ

2.3 МОДЕЛИ ОТКАЗОВ

2.1 Источники и причины отказов объектов

Во время эксплуатации объект подвергается внешним и внутренним воздействиям, которые с течением времени приводят к потере работоспособности объекта. **Выделяют три источника воздействий:**

- 1) действие энергии окружающей среды (включая человека, выполняющего функции оператора и ремонтника);
- 2) внутренние источники энергии, связанные с рабочими процессами, протекающими в объекте;
- 3) накопленная потенциальная энергия материалов, из которых изготовлен объект (внутренние напряжения в отливках, монтажные напряжения и т. п.).

Различные виды энергии (механическая, тепловая, электромагнитная и проч.), действуя на объект, инициируют в его составных частях процессы, изменяющие свойства или состояние материалов.

Эти процессы связаны, как правило, со сложными физико-химическими явлениями и приводят к деформации, износу, поломке и другим видам повреждений (отклонений контролируемых свойств материалов от их первоначального уровня).

Накопление повреждений, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных качественных параметров объекта, что, в конечном счете, приводит к отказу.

Процессы, снижающие работоспособность объекта, по признаку скорости протекания можно разделить на три группы:

1) быстропротекающие имеющие периодичность изменения, составляющую малую долю продолжительности рабочего цикла объекта.

К ним можно отнести:

- вибрации деталей и узлов;
- изменения сил трения в подвижных сопряжениях;
- колебания уровня рабочих нагрузок и другие процессы, искажающие рабочий цикл объекта;

2) средней скорости, имеющие периодичность, сравнимую с длительностью рабочего цикла объекта. Они приводят к монотонному изменению выходных параметров объекта.

Например:

- необратимый процесс изнашивания режущего инструмента (интенсивность изнашивания инструмента значительно превосходит интенсивность изнашивания деталей подвижных сопряжений);
- обратимые процессы тепловых деформаций, обусловленные как диссипацией энергии рабочих процессов, так и суточными колебаниями температуры окружающей среды.

Обратимые процессы (в отличие от необратимых) временно изменяют выходные параметры объекта без тенденции прогрессивного ухудшения.

Следует отметить, что в ряде случаев обратимый процесс может инициировать необратимый процесс, приводящий к накоплению повреждений, например, тепловая деформация шпинделя металлорежущего станка может привести к возрастанию нагрузки на подшипники и их ускоренному износу или поломке, т. е. отказу;

3) медленные с периодичностью, сравнимой с длительностью межремонтного периода. К ним можно отнести:

- процессы изнашивания деталей подвижных сопряжений;
- перераспределение внутренних напряжений в деталях вследствие процесса старения материалов;
- ползучесть материалов;
- процессы коррозии;
- загрязнение трущихся поверхностей деталей.

Обычными методами борьбы с последствиями медленных процессов являются периодические ремонты и технические обслуживания.

Виды повреждений объектов и их составных частей и соответствующие им отказы можно разбить на две группы:

- допустимые, возникающие при нормальных условиях эксплуатации (износ режущего инструмента, поломки деталей предохранительных устройств и т. п.). Полностью устранить этот вид повреждений невозможно, но можно замедлить их проявление;
- недопустимые, возникающие вследствие наличия дефектов или случайных неконтролируемых внешних причин, непосредственно не связанных с техническим состоянием рассматриваемого объекта (аварии, стихийные бедствия и т. п.).

Под **дефектом** понимается каждое отдельное несоответствие объекта установленным требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, снижающее его уровень надежности.

Следует отметить, что объект, имеющий дефект, может находиться в работоспособном состоянии. Дефект рассматривается как возможная причина возникновения отказа, но наличие дефекта не означает, что отказ произошел.

По стадии происхождения дефекты можно разделить на три группы:

1) дефекты (ошибки) проектирования, например:

- недостаточная защищенность узлов трения;
- наличие концентраторов напряжений на деталях;
- неправильный расчет несущей способности деталей (приводит к их статическому разрушению или малоцикловой усталости);
- неправильный выбор материалов;
- неправильное определение предполагаемого уровня эксплуатационных нагрузок и т. п.;

2) дефекты изготовления (производственные):

- заготовок (пористость, инородные включения и т. п.);
- механической обработки (заусенцы, избыточная локальная пластическая деформация и т. п.);
- сварки (трещины, остаточные напряжения, термические повреждения и т. п.);
- термообработки (перегрев, закалочные трещины, поводка, коробление, обезуглероживание поверхностного слоя);
- сборки (повреждения поверхностей, задиры, перекосы, внесение абразива и т. п.);

3) дефекты эксплуатации:

- нарушение условий применения;
- неправильное техническое обслуживание и ремонт;
- наличие перегрузок;
- применение некачественных эксплуатационных материалов.

2.2 Классификация отказов

Как мы уже знаем, **отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Можно дать классификацию отказов по ряду критериев:

1) Характер изменения выходного параметра объекта до момента возникновения отказа;

✓ ***внезапные***, возникающие в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих возможности объекта к их восприятию.

- ✓ **постепенные** (износные), которые возникают в результате постепенного протекания того или иного процесса повреждения, прогрессивно ухудшающего выходные параметры объекта.
- ✓ **сложные** – отказы, которые включают особенности двух предыдущих.

2) Возможность дальнейшего функционирования объекта после возникновения отказа.

- ✓ **функционирования**, при которых объект перестает выполнять свои функции (в результате поломок, заклинивания и т. п.);
- ✓ **параметрические**, характеризующиеся отклонением хотя бы одного рабочего параметра объекта за пределы допуска.

3) Возможность последующего использования объекта после возникновения отказа.

- ✓ **полные** – отказы, после которых использование объекта по назначению невозможно (для восстанавливаемых объектов использование невозможно до восстановления);
- ✓ **частичные** – отказы, после возникновения которых объект может быть использован по назначению, но с меньшей эффективностью или когда вне допустимых пределов находятся значения не всех, а одного или нескольких выходных параметров объекта.

4) Связь между отказами объекта.

- ✓ **независимые** – отказы, не обусловленные другими отказами или повреждениями объекта;
- ✓ **зависимые** – отказы, обусловленные другими отказами или повреждениями объекта.

5) Устойчивость состояния неработоспособности.

- ✓ **устойчивые**, которые можно устранить только путем восстановления (ремонта);
- ✓ **самоустраняющиеся**, устраняемые без операций восстановления путем регулирования или саморегулирования;
- ✓ **перемежающиеся** – многократно возникающие самоустраняющиеся отказы одного и того же характера;
- ✓ **сбои** – самоустраняющиеся отказы или однократные отказы, устраняемые незначительным вмешательством оператора.

6) Наличие внешних проявлений отказа.

- ✓ **явные**, обнаруживаемые визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению;
- ✓ **скрытые**, не обнаруживаемые визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемые при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

Большинство параметрических отказов относятся к категории скрытых.

7) В зависимости от **причины возникновения** различают отказы:

- ✓ **конструктивные**, возникающие по причинам, связанным с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования;
- ✓ **производственные**, происходящие из-за несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии;
- ✓ **эксплуатационные**, связанные с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации;
- ✓ **деградационные**, обусловленные естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

8) Природа происхождения отказа.

- ✓ искусственные, вызываемые преднамеренно, например, с исследовательскими целями или с целью необходимости прекращения функционирования объекта;
- ✓ естественные, происходящие без преднамеренной организации.

9) Время возникновения отказа.

- ✓ при испытаниях;
- ✓ приработочные;
- ✓ периода нормальной эксплуатации;
- ✓ периода старения.

10) Возможность устранения отказа.

- ✓ устранимые;
- ✓ неустранимые.

11) Критичность отказа (уровень прямых и косвенных потерь, трудоемкость восстановления).

- ✓ критические (существенные);
- ✓ некритические (несущественные).

2.3 Модели отказов

В литературе наиболее изученными являются следующие модели отказов.

1 Модель мгновенных повреждений (внезапные отказы).

Если предположить, что отказ элемента происходит при превышении нагрузкой (или иным входным воздействием) допустимого уровня, то вследствие случайного характера изменения нагрузки момент отказа также является случайным и не зависит от того, сколько времени элемент уже находился в эксплуатации.

2 Модель накапливающихся изменений (постепенные отказы).

Постепенное старение и (или) износ элементов приводит к изменению значений их рабочих параметров. Постепенно ухудшается качество функционирования всего изделия. Выход показателей качества функционирования системы за нижний допустимый предел влечет за собой отказ изделия.

3 Модель релаксации.

Эта схема наблюдается в тех случаях, когда старение и (или) износ могут явиться косвенной причиной отказа. Если, например, допустимые пределы на параметры элементов не установлены, то постепенное изменение параметров может привести к скачкообразному изменению состояния изделия. Например, отказ резервных электронных элементов приводит иногда к перегрузке основных элементов и к отказу системы.

4 Модель действия нескольких независимых причин.

Три перечисленных выше способа часто реализуются в сочетании друг с другом.

5 Модель действия нескольких зависимых причин.

В четвертой и пятой схемах совокупность зависимых (или независимых) причин возможно (хотя и сложно) заменить одной «эквивалентной».