

# Элементы теории надежности

# 1. Основные понятия и определения теории надежности.



*Модель состояния оборудования*

# ГОСТ 27.002-2015

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

**Исправность** — состояние объекта, при котором он соответствует всем установленным требованиям.

**Неисправность** — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из указанных требований.

**Работоспособность** — состояние соответствия установленным требованиям тех параметров, которые характеризуют способность выполнять указанные функции.

**Неработоспособность** — состояние, при котором хотя бы один параметр работоспособности не соответствует установленным требованиям.

**Предельное состояние** — состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима по условиям безопасности или нецелесообразна по экономическим критериям.

Центральным понятием теории надежности служит **отказ** — событие, заключающееся в потере работоспособности, т. е. переход из работоспособного в неработоспособное состояние.

**Внезапные отказы** наступают неожиданно, мгновенно из-за внезапной концентрации нагрузки или аварийной ситуации.

**Постепенные отказы** возникают под действием постепенного изменения свойств объектов, старения или износа деталей.

**Полный отказ** приводит к полной потере работоспособности, а **частичный** — лишь к утрате отдельных функций объекта.

**Объект** (в теории надежности) — предмет определенного целевого назначения, в жизненном цикле которого выделяют стадии проектирования, изготовления и эксплуатации. Объектом может быть система или элемент.

**Система** — это совокупность взаимосвязанных устройств, предназначенная для самостоятельного достижения некоторой цели.

**Элемент** — часть системы, которая способна выполнять некоторые локальные функции системы.

Элементы и системы, допускающие восстановление работоспособности после отказа, называют восстанавливаемыми, а в противном случае — невосстанавливаемыми (неремонтируемыми).

К *первому виду* — трансформаторы и двигатели;  
к *второму* — электроосветительные лампы и трубчатые нагреватели.

Элементы (системы) имеют три главных признака, характеризующих:

- природу отказов (*внезапные и постепенные*);
- виды отказов | по их последствиям (*полные и частичные*);
- приспособленность к ремонту (*ремонтируемые и неремонтируемые*).

**Простым** считают элемент, который имеет внезапные полные отказы, поэтому не подлежит ремонту.

**Сложный** элемент имеет наряду с перечисленными и ряд дополнительных признаков, т. е. он имеет *внезапные и постепенные* отказы (или только постепенные), отказы могут быть *частичными*, их последствия устраняют в процессе ремонта.



**Надежность** — сложное, комплексное свойство объекта, включающее ряд более простых свойств:

- ***безотказность*** — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или наработки;
- ***долговечность*** — свойство объекта сохранять работоспособность объекта до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта;
- ***ремонтпригодность*** — приспособленность к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов (повреждений), к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов;

- ***сохраняемость*** — свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности во время хранения или транспортировки;
- ***устойчивость*** — способность объекта переходить при различных возмущениях от одного устойчивого режима к другому;
- ***живучесть*** — свойство системы противостоять крупным возмущениям, не допуская развития аварий.

Конструкционной надежностью называют номинальную, которая определяет способность к стабильному функционированию в типовых (номинальных) условиях эксплуатации. Она характеризует свойства объекта, заложенные при его проектировании и изготовлении.

Под эксплуатационной надежностью понимают, наблюдаемую в условиях эксплуатации с учетом всей совокупности воздействий:

- дестабилизирующих факторов окружающей среды;
- реальных режимов использования;
- качества технического обслуживания и ремонтов.

## **2. Показатели надежности.**

С помощью показателей сравнивают надежность различных объектов между собой или надежность одного и того же объекта в разных условиях либо на разных этапах эксплуатации.

*Единичный* показатель относят к одному из свойств, а *комплексный* - к нескольким свойствам.

**Показатели безотказности** характеризуют способность объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени (некоторой наработки).

Предположим, что в эксплуатацию своевременно введено  $N(0)$  ламп накаливания и поставлена задача найти количественные показатели их безотказности. Параметром работоспособности лампы служит ее световой поток  $F$ . Лампа работоспособна, когда создаваемый ею световой поток находится в допустимых пределах от номинального значения  $F_H$ . Выход параметра за пределы допустимого отклонения  $F_{min}$  означает наступление отказа лампы.

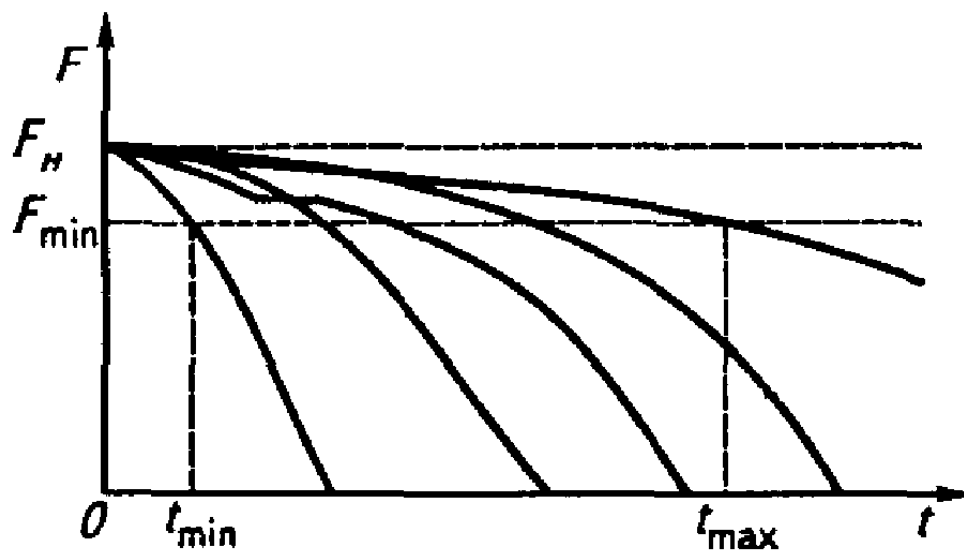


Рис. 2. Результаты наблюдения за изменением светового потока ламп накаливания

***Вероятность безотказной работы  $p(t)$***  — вероятность того, что в пределах заданного времени (наработки) не возникнет отказа.

Продолжительность безотказной работы  $T$  будет больше заданного времени  $t$ , т. е.  $p(t) = p(T > t)$ .

***Вероятность безотказной работы*** - численная мера объективной возможности успешной работы объекта в течение интересующего нас периода времени.

В примере (рис. 2)  $N(0)$  ламп, пущенных в эксплуатацию при  $t = 0$ , после некоторого времени  $t$  сохранили свою работоспособность  $N(t)$ , а отказали  $m(t) = N(0) - N(t)$  ламп, то статистическую вероятность безотказной работы за время  $t$  находят из классического определения вероятности события:

$$p(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = 1 - \frac{m(t)}{N(0)}$$

Где:  $N(t)$ — число объектов, оставшихся работоспособными за время  $t$ ,

$N(0)$ — число объектов в начале наблюдения;

$m(t)$ — число отказов (или отказавших объектов) за время  $t$ .

*Средняя наработка до отказа*  $T_{cp}$  — это математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N(0)}$$

Где:  $t_i$  — наработка (продолжительность безотказной работы)  $i$ -го элемента до первого отказа;

$N(0)$  — число испытываемых элементов в начале наблюдений.



**Средняя наработка на отказ  $T_0$**  — это среднее время наработки восстанавливаемого объекта между отказами.

$$T_0 = \frac{1}{m_i} \sum_{i=1}^{m_i} t'_i$$

где  $m_i$  — число отказов  $i$ -го элемента;

$t'_i$  — наработка  $i$ -го элемента за время наблюдений.

**Интенсивность отказов  $\lambda(t)$**  - среднее число отказов, приходящихся на единицу наработки невосстанавливаемого объекта.

$$\lambda(t) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t'_2) - \sum_{i=1}^N m_i(t'_1)}{N(t'_1)(t'_2 - t'_1)}$$

Где:  $\sum_{i=1}^N m_i(t'_2)$ ;  $\sum_{i=1}^N m_i(t'_1)$  - число отказов объектов  $N$  от начала наблюдений до наработки  $t'_2$  и  $t'_1$  соответственно;

$N(t'_1)$  - число исправных объектов от начала наблюдений до наработки  $t'_1$ ;

$(t'_2 - t'_1)$  - изучаемый интервал наработок.

Для **восстанавливаемых** объектов вместо интенсивности отказов используют **параметр потока отказов** — среднее число отказов, приходящихся на единицу наработки.

$$\omega(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{t'_i}$$

Где:  $m_i$  — число отказов  $i$ -го элемента;

$t'_i$  — наработка  $i$ -го элемента за время наблюдений;

$N$  — число элементов в эксплуатации.

### **3. Показатели долговечности, сохраняемости и комплексные показатели надежности.**

Под долговечностью понимают свойство элемента сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при надлежащем техническом обслуживании и ремонте.

Для невозстановливаемых элементов долговечность совпадает с временем их эксплуатации до отказа.  
Количественные оценки долговечности - срок службы и ресурс.

**Ресурсом** называют наработку объекта от начала эксплуатации или после ремонта до наступления предельного состояния. Различают средний ресурс и гамма-процентный ресурс.

**Средний срок службы** - средняя календарная продолжительность службы объектов. Различают средний срок службы до первого капитального ремонта и между капитальными ремонтами.

**Гамма-процентный срок службы** - средняя календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью у процентов.

**Средний срок службы до списания** - средняя календарная продолжительность эксплуатации до предельного состояния.

***Показатели сохраняемости*** характеризуют свойство элемента сохранять эксплуатационные качества во время хранения и транспортировки.

Для этого используют ***средний срок сохраняемости***  $T_x$  и ***интенсивность отказов при хранении***  $\lambda_x$ . Свойство сохраняемости можно рассматривать как специфический случай безотказности в период хранения и транспортировки.

## *Комплексные показатели надежности.*

*Коэффициент готовности  $K_{\Gamma}$*  характеризует готовность объекта к применению по назначению

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0}{T_0 + T_B}$$

где  $T_0$  — средняя наработка на отказ;

$T_B$  — среднее время восстановления.

*Коэффициент готовности* — это вероятность застать объект в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (без учета простоя по организационным причинам).

**Коэффициент оперативной готовности  $K_{O.G}$**   
характеризует готовность объекта к функционированию  
с учетом простоев по организационным причинам

$$K_{O.G} = \frac{T_0}{T_0 + T_B + T_{ОРГ}}$$

Где:  $T_{ОРГ}$  — простои по организационным причинам:  
вызов ремонтных бригад, доставка запасных частей и т. п.



**Коэффициент технического использования  $K_{Т.И}$**  характеризует время нахождения объекта в работоспособном состоянии с учетом простоя объекта на всех видах технического обслуживания и ремонта

$$K_{Т.И} = \frac{T_{СУМ}}{T_{СУМ} + T_{Т.О} + T_{РЕМ}}$$

Где:  $T_{СУМ}$  — суммарная наработка;

$T_{Т.О}$  ,  $T_{РЕМ}$  — суммарное время пребывания в обслуживании и ремонте.

#### **4. Показатели надежности электроснабжения.**

Основными показателями надежности принято считать *число ( $n$ ) и длительность ( $T_{\text{откл}}$ ) отключений.*

*Эквивалентной продолжительности отключений*  
*( $T_{\text{ЭКВ}}$ )*

$$T_{\text{ЭКВ}} = T_{\text{ав}} + \gamma T_{\text{пл}}$$

Где:  $T_{\text{ав}}$ ,  $T_{\text{пл}}$  — продолжительности аварийных и плановых отключений соответственно;

$\gamma$  — коэффициент, учитывающий меньшую тяжесть плановых отключений ( $\gamma = 0,1 \dots 0,4$ ).

## Вероятностные характеристики случайной величины:

$x_{min} \dots x_{max}$  - интервал возможных значений;

$\bar{x} = M[x]$  - математическое ожидание  
(среднее значение);

$\sigma^2 = M[x_i - \bar{x}]^2$  - дисперсия — математическое  
ожидание квадрата отклонения  
величины от среднего значения;

$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$  - среднее квадратическое отклонение;

$v_x = \frac{\sigma}{\bar{x}}$  - коэффициент вариации.

Различают интегральные ( Рис.3.) и дифференциальные ( Рис.4.) функции распределения.

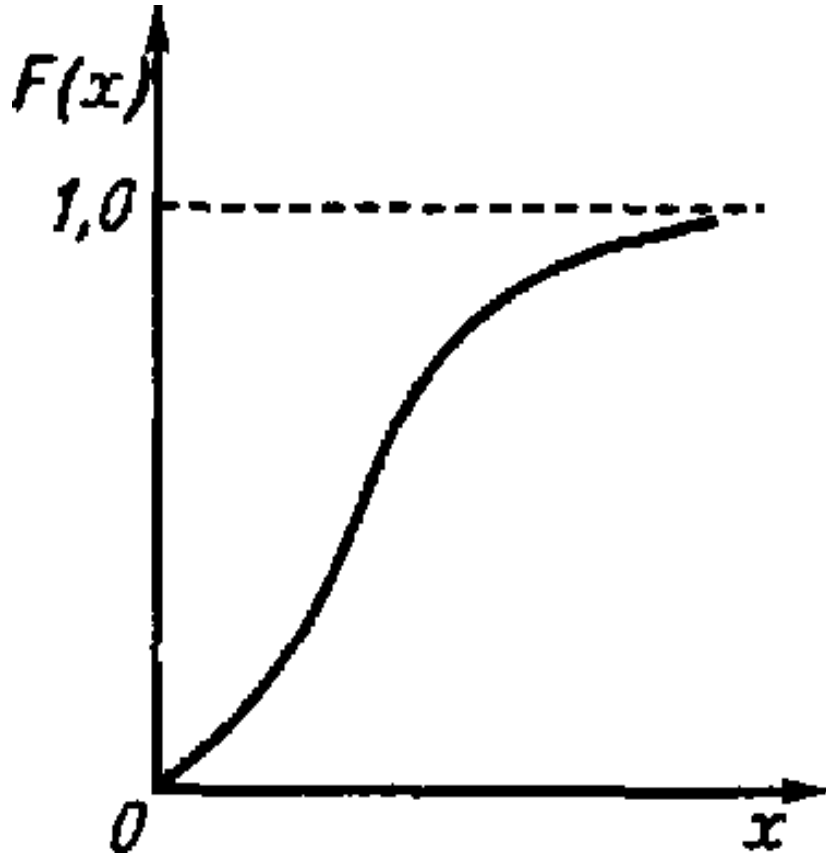


Рис.3.

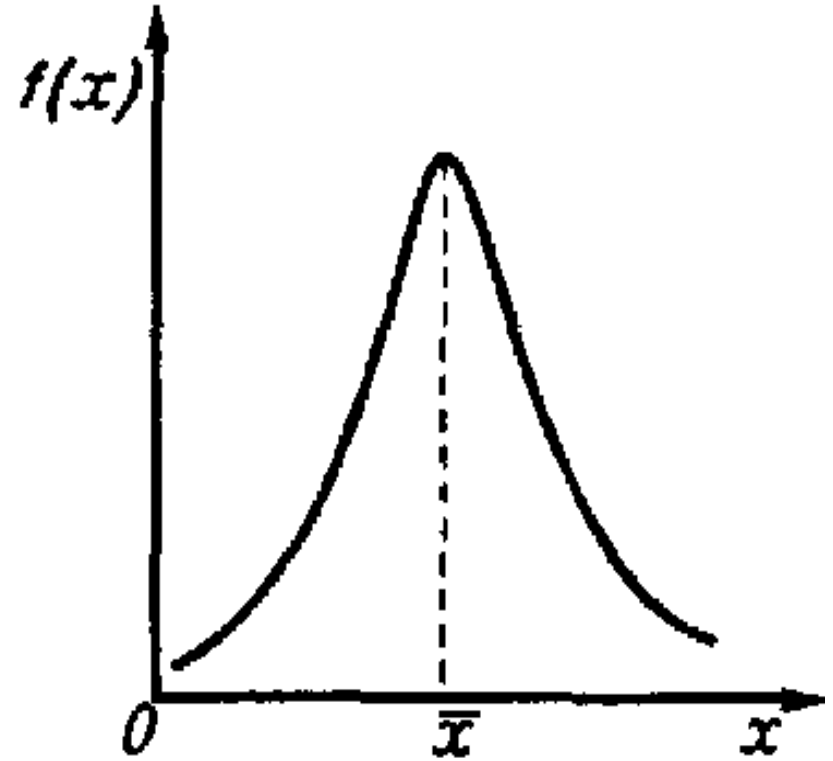


Рис. 4.

Типовые (функции) законы распределения: равномерный, нормальный, экспоненциальный, Пуассона, Вейбулла и т. п.

***Закон равномерного распределения*** (рис. 5)

описывает случайные величины, у которых частота появления не зависит от значения величины в интервале

$x_{min} \dots x_{max}$

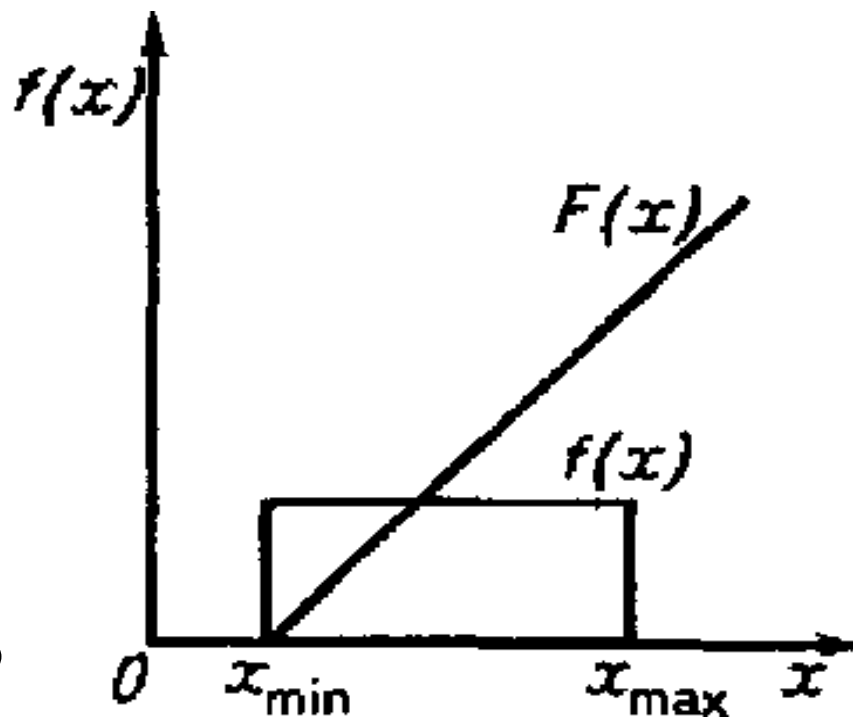


Рис. 5

*Закон нормального распределения* (рис. 6) получил наибольшее распространение, т. к. он достаточно полно описывает случайные величины массовых явлений.

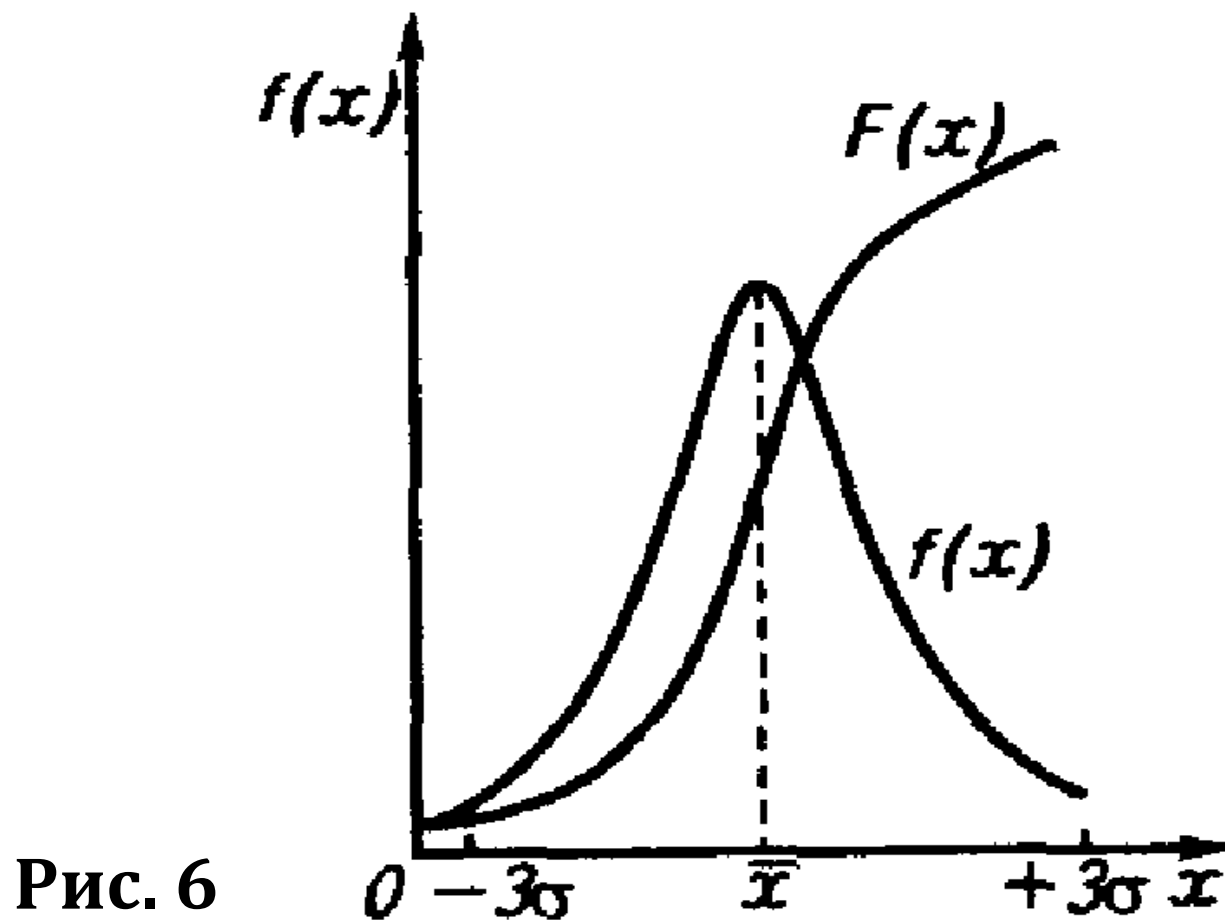


Рис. 6

*Закон экспоненциального распределения* (рис. 7) описывает случайные величины, у которых вероятность появления меньших значений всегда выше, чем больших.

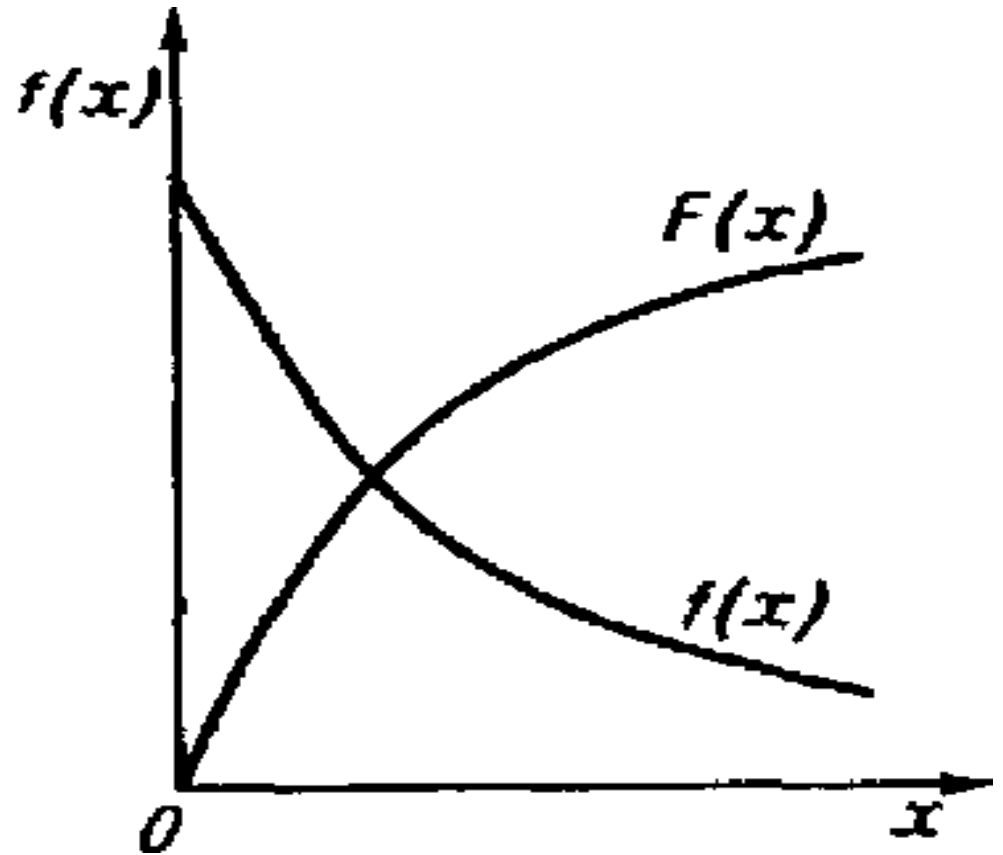


Рис. 7

В теории надежности чаще всего используют экспоненциальный закон. Вероятность безотказной работы тождественно равна вероятности появления случайной величины со значением  $t > t_i$  т. е.

$$P(t > t_i) = \int_{t_i}^{\infty} f(t) dt$$

Интенсивность отказов по определению аналогична плотности распределения случайной величины.

$$\lambda(t) = f(t) / P(t)$$

Средняя наработка на отказ:

$$T_0 = M(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt$$



## ***Основной закон надежности.***

Теория вероятностей устанавливает аналитическую связь между основными параметрами надежности: ***вероятностью безотказной работы;***  
***средней наработкой на отказ;***  
***и интенсивностью отказов.***

Математическое описание этой зависимости называют основным законом надежности.

$$\lambda(t) = f(t)/P(t)$$

$$f(x) = \frac{dP(t)}{d(t)}$$

$$\frac{dP(t)}{d(t)} = \lambda(t)P(t) \quad (4.1)$$

$$P(t) = e^{-\int_t^{\infty} f(t)dt} \quad (4.2)$$

При  $t = 0$   $P(t) = 1$ ;      при  $t \rightarrow \infty$   $P(t) = 0$

При экспоненциальном распределении основной закон надежности характеризуют постоянным значением интенсивности отказов  $\lambda(t) = \text{const}$

$$T_o = \frac{1}{\lambda(t)} \quad (4.3)$$

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{T_o}} \quad (4.4)$$

**Основной закон надежности в линейной форме.** В отдельных эксплуатационных ситуациях, когда мала интенсивность отказа изделия или мал исследуемый промежуток времени, можно использовать не экспоненциальную, а линейную форму основного закона надежности.

$$P(t) = e^{-\lambda t} = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots$$

$$P(t) = 1 - \frac{1}{T_o} \quad P(t) = 1 - \lambda t$$