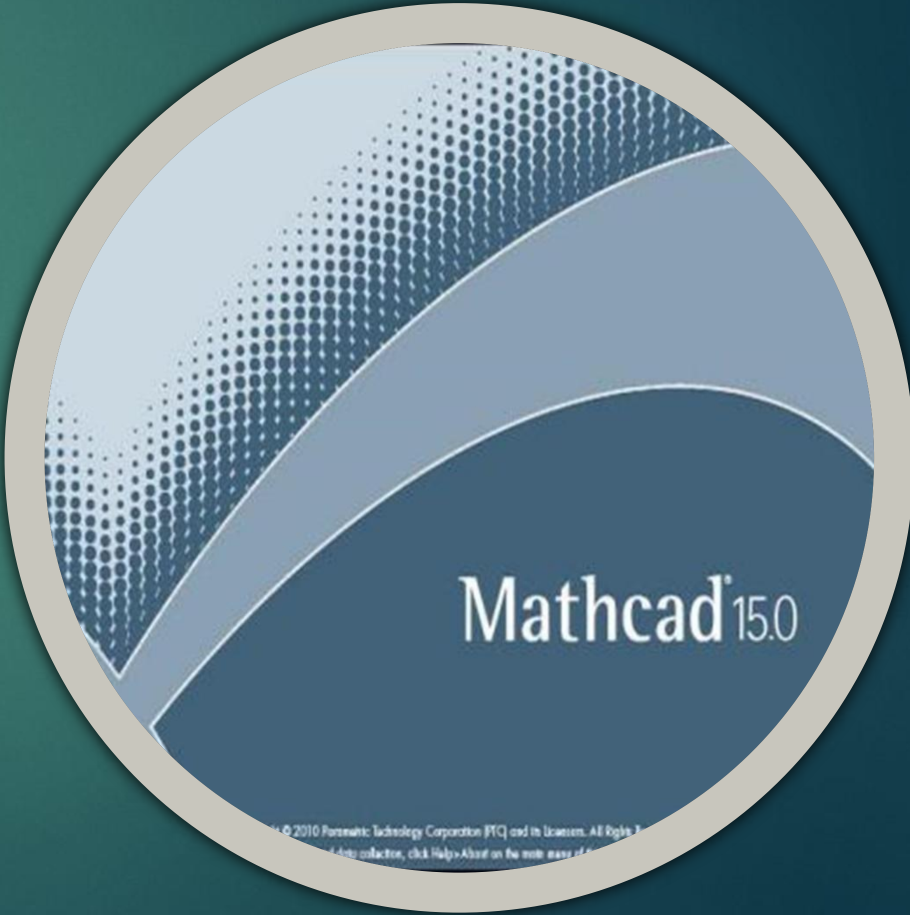
Федеральное агентство связи
Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»
Кафедра «Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации»

Курс лекций по дисциплине **«Надежность технических систем»**

(направления 15.03.04, 27.03.04)



Москва - 2020

Темы лекционных занятий

1. Введение. Основные понятия теории надежности.
2. Основные количественные характеристики надежности.
3. Расчет надежности технических систем. Абстрактное описание процесса функционирования. Требования к показателям надежности.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Теория надежности есть наука, изучающая закономерности особого рода явлений – отказы технических объектов (элементов, устройств и систем). Как и всякая наука она имеет свои понятия и определения. К основным фундаментальным понятиям теории надежности относятся понятия *надежность* и *отказ.*

В соответствии ГОСТ «Надежность в технике. Термины и определения» *надежность* – это свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Другими словами, *надежность – это свойство объекта выполнять заданные функции в определенных условиях эксплуатации.*

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость в отдельности или определенное сочетание этих свойств как для объекта, так и для его частей.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта, называется <u>отказом</u>.

Состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно- технической документацией называют *работоспособностью (работоспособным состоянием)*.

Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки называют *безотказностью*.

Свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов называют *долговечностью*. Другими словами, долговечность – это суммарная продолжительность работы, ограниченная износом, старением или другими предельными состояниями.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа подлежит восстановлению называется *восстанавливаемым*. В противном случае объект называют *невосстанавливаемым.*

Продолжительность или объем работы объекта называют *наработкой.*

Отказы и их классификация

Отказы можно классифицировать по различным признакам.

- По характеру возникновения различают отказы *внезапные и постепенные*.

Внезапным называют отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта.

Постепенным – отказ, характеризующийся постепенным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта.

Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (поломки, трещины, обрывы, пробои изоляции и т.п.), из-за чего эти отказы иногда называют грубыми. Внезапные отказы получили свое название из-за того, что обычно отсутствуют видимые признаки их приближения, т.е. перед отказом обычно не удается обнаружить количественные изменения характеристик объекта.

Постепенные отказы (их еще называют параметрическими) связаны с износом деталей, старением материалов и разрегулированием устройств. Параметры объекта могут достигнуть критических значений, при которых его состояние считается неудовлетворительным, т.е. происходит отказ.

Внезапный отказ объекта также является следствием накопления необратимых изменений материалов. Иначе говоря, возникновение внезапного отказа также является следствием случайного процесса изменения какого-то параметра объекта. Внезапным отказ кажется лишь потому, что не контролируется изменяющийся параметр, при критическом значении которого наступает отказ объекта, обычно связанный с его механическим повреждением.

Таким образом, возникновению всякого отказа предшествует накопление тех или иных изменений внутри объекта (при этом, конечно, не рассматриваются отказы, происшедшие из-за небрежности или неумения работников).

- По связи с другими отказами можно различать *независимые отказы,* не обусловленные повреждениями или отказами других элементов объекта, и *зависимые отказы*, обусловленные отказами других элементов.

- По причинам, приведшим к возникновению отказа, различают *конструкционный* отказ, возникающий в результате ошибок проектирования (конструирования), *производственный* отказ, возникший в результате нарушения установленного процесса изготовления или ремонта, и *эксплуатационный* отказ, причиной которого стало нарушение правил и условий эксплуатации.

- По характеру устранения можно различать окончательные (устойчивые) и *перемежающиеся* (то возникающие, то исчезающие) отказы. Перемежающиеся отказы в большинстве случаев являются следствием обратимых случайных изменений режимов работы и параметров объектов. При возвращении режима работы в допустимые пределы объект сам, обычно без вмешательства человека, возвращается в работоспособное состояние. Перемежающиеся отказы особенно неприятны в информационных системах, где они известны под названием *сбоев* (*сбой* – самоустраняющийся отказ, приводящий к кратковременному нарушению работоспособности). Появление сбоев трудно обнаружить, так как после их исчезновения объект остается работоспособным.

ОСНОВНЫЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ.

Количественная сторона проблемы надежности состоит в изучении *закономерностей* появления *отказов* и *восстановления работоспособности*. События, названные нами отказом и восстановлением, являются случайными, а поэтому их изучение и количественная оценка осуществляется на основе методов теории вероятностей.

Рассмотрим работу некоторого технического объекта (например, элемента) до первого отказа.

Пусть в момент *t=0* элемент начинает работу, а в момент *t=T* происходит отказ.

Время *T*, прошедшее от начала работы элемента до момента отказа – время жизни элемента, назовем *временем безотказной работы* (наработкой).

Вероятность того, что при определенных режимах и условиях эксплуатации, в пределах заданной продолжительности работы устройства отказ не произойдет, называют *вероятностью безотказной работы*) – $P(t)$ (функцией надежности).

Если обозначить через t время, в течение которого надо определить вероятность безотказной работы, то $P(t)$ есть вероятность того, что случайная величина T будет больше или равна t, т.е.

$$P(t)=P(T\geq t). \qquad (1)$$

Примерный вид функции $P(t)$, приведен на рис.1.

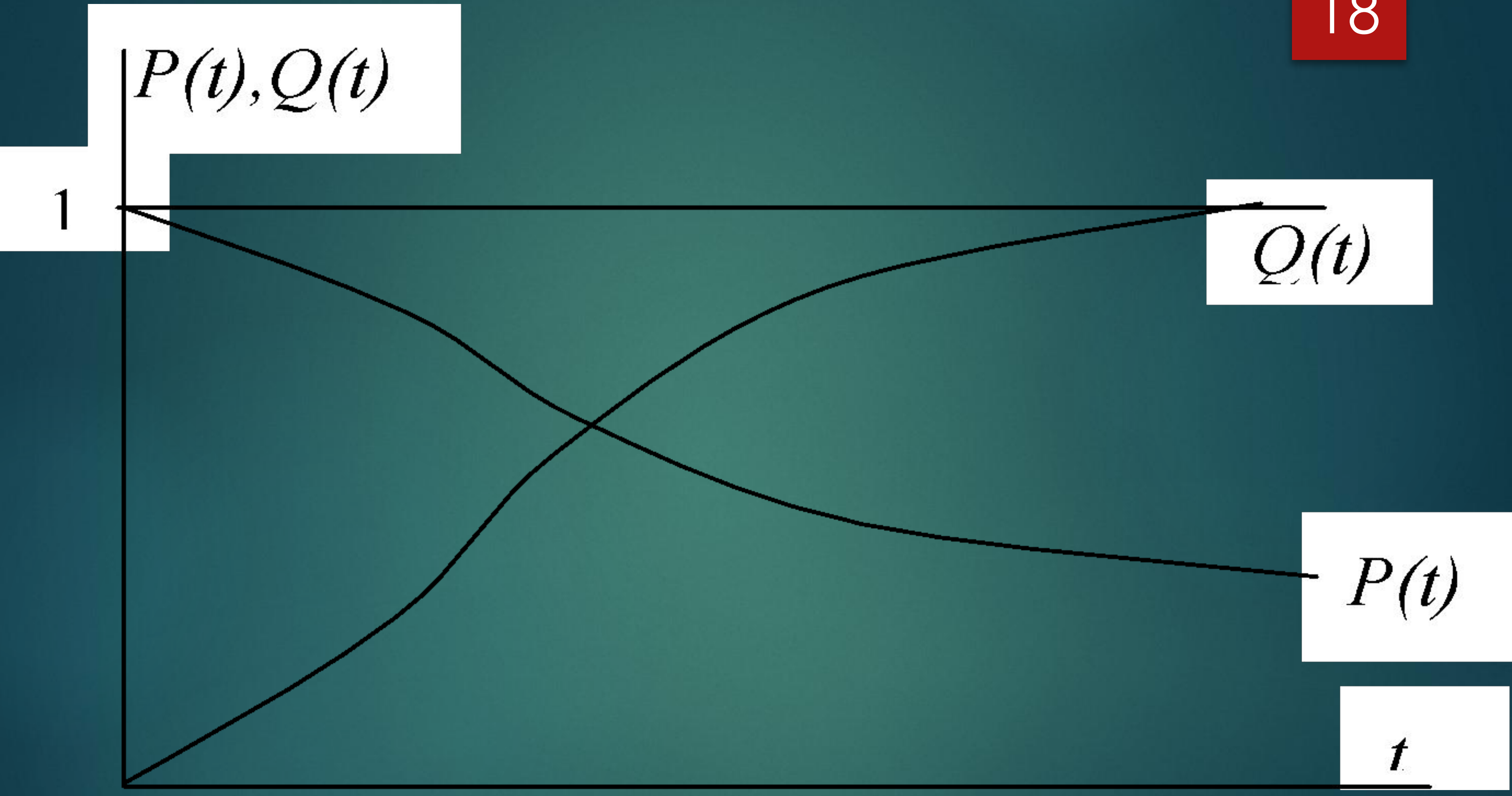


Рис. 1. Вероятность безотказной работы *P(t)* и вероятность отказа *Q(t)*.

Можно показать, что $P(t)$ – есть не возрастающая функция своего аргумента, обладающая свойствами:

1. $P(0) = 1$.
2. $P(t) \to 0$ при $t \to \infty$.

Свойство 1. предполагает, что в начальный момент времени, т.е. в момент включения отказа быть не может. Практически это не всегда так, поэтому свойство 1 можно принять лишь с оговоркой, что перед включением устройство прошло специальную проверку.

Функцию $P(t)$ можно приближенно найти из опыта. Предположим, что нам нужно найти значение этой функции при $t=t_0$, т.е. вероятность безотказной работы в течение времени t_0.

Поставим на испытание N одинаковых элементов и будем испытывать их в идентичных условиях в течение времени t_0. Пусть к моменту окончания испытаний отказало n элементов. Можно рассматривать наш эксперимент как серию из N независимых испытаний, при каждом из которых происходит одно из двух событий: или элемент отказывает, или он не отказывает.

Но тогда отношение $\frac{N-n}{N}$ есть частота появления второго события, и по теореме Бореля с вероятностью единица

$$\frac{N-n}{N} \to P(t_0) \text{ при } N \to \infty.$$

Это означает, что при большом N с вероятностью близкой к единице имеет место приближенное равенство

$$\frac{N-n}{N} \approx P(t_0).$$

Если хотим найти функцию $P(t)$ для всех значений $t \le t_0$, то в процессе испытаний необходимо отмечать моменты возникновения отказов. Зная их, легко определить функцию $m(t)$, которая равна числу элементов, не отказавших к моменту t. В начальный момент эта функция равна $m(0)=N$, а в момент каждого отказа она уменьшается на единицу.

Отношение

$$P_N(t)=\frac{m(t)}{N}$$

называется эмпирической функцией надежности.

С ростом N эта функция равномерно приближается к функции $P(t)$, и для больших N имеет место соотношение

$$P_N(t) = \frac{m(t)}{N} \approx P(t)$$

Вероятность отказа

Интегральный закон распределения случайной величины T в теории надежности называют вероятностью отказа и обозначают $Q(t)$.

$$Q(t) = P(T < t). \qquad (2)$$

Вероятность отказа – вероятность того, что в заданном интервале времени t и при данных условиях эксплуатации произойдет хотя бы один отказ.

Функция $Q(t)$ – неубывающая (Рис. 1).

Вероятность отказа и вероятность безотказной работы связаны очевидным соотношением:

$$P(t) + Q(t) = 1. \qquad (3)$$

Дифференциальный закон распределения времени безотказной работы

Производная от функции распределения, как известно, характеризует плотность, с которой распределено значение случайной величины в данной точке. Эта функция называется плотностью распределения непрерывной случайной величины.

$$q(t)=\frac{dQ(t)}{dt}=\frac{d(1-P(t)}{dt}=-\frac{dP(t)}{dt}. \qquad (4)$$

Плотность распределения $q(t)$ является дифференциальной формой закона распределения времени безотказной работы (наработки до отказа) T. Плотность $q(t)$ является неотрицательной функцией, причем

$$\int_0^\infty q(t)dt = 1.$$

В соответствии с (4) вероятность безотказной работы и вероятность отказа связаны с частотой отказа $q(t)$ соотношениями

$$P(t) = 1 - \int_0^t q(x)dx = \int_t^\infty q(x)dx;$$

$$Q(t) = \int_0^t q(x)dx.$$

Величина $q(t)dt$ характеризует вероятность отказа за время $(t,t+dt)$ объекта, взятого наугад из множества одинаковых объектов. При этом неизвестно, работоспособен ли этот объект к началу интервала (т.е. в момент t) или отказал ранее. Это не всегда удобно на практике, и $q(t)$ как самостоятельный показатель надежности невосстанавливаемых (неремонтируемых) объектов находит ограниченное применение.

Интенсивность отказов

Одной из наиболее распространенных количественных характеристик надежности является *интенсивность отказов*, которую обозначают буквой λ.

Условную вероятность отказа объекта в течение наработки $(t, t+dt)$ в предположении его безотказной работы до момента t обычно выражают формулой

$$z = \lambda(t)dt,$$

где величина $\lambda(t)$ называется *интенсивностью отказов*.

Таким образом, при использовании $\lambda(t)$ рассматриваются лишь остающиеся работоспособными к моменту t объекты, а отказавшие исключаются из рассмотрения.

$$\lambda(t) = \frac{q(t)}{p(t)} = -\frac{\frac{dp(t)}{dt}}{p(t)}, \tag{6}$$

Решение уравнения (6) при начальном условии $p(0)=1$ дает для функции надежности формулу

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x)dx} = \exp\left[-\int_0^t \lambda(x)dx\right]. \tag{7}$$

При $\lambda = const$ формула (7) существенно упрощается:

$$p(t) = \exp(-\lambda t). \tag{8}$$

Вероятность безотказной работы в течение наработки (t_1, t_2) объекта, который был работоспособным к началу этого интервала,

$$p(t_1, t_2) = \frac{p(t_2)}{p(t_1)} = \frac{\exp\left[-\int\limits_0^{t_2} \lambda(x)dx\right]}{\exp\left[-\int\limits_0^{t_1} \lambda(x)dx\right]} = \tag{9}$$

$$= \exp\left[-\int\limits_{t_1}^{t_2} \lambda(x)dx\right].$$

При $\lambda = const$ вероятность безотказной работы в течение наработки (t_1, t_2) не зависит от возраста объекта:

$$p(t_1, t_2) = p(t') = \exp(-\lambda t'), \qquad (10)$$

где $t' = t_2 - t_1$.

При $\lambda t' << 1$ обычно полагают:

$$\exp(-\lambda t') \approx 1 - \lambda t'.$$

Статистически интенсивность отказов определяется как отношение числа отказавших элементов в единицу времени к среднему числу элементов, продолжающих исправно работать.

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{N_{\text{ср}}(\Delta t)\Delta t}, \qquad (11)$$

где Δn - число элементов, отказавших за время Δt

$$N_{\text{ср}} = \frac{N_{i-1} + N_i}{2} \qquad (12)$$

N_{i-1} - число исправно работающих элементов в начале интервала,

N_i - число исправно работающих элементов в конце интервала времени Δt.

Интенсивность отказов λ показывает, какая часть элементов выходит из строя в единицу времени (обычно в час), другими словами, λ показывает, сколько отказов следует ожидать в единицу времени.

Согласно установившимся в теории надежности представлениям кривая имеет вид, показанный на рис.2.

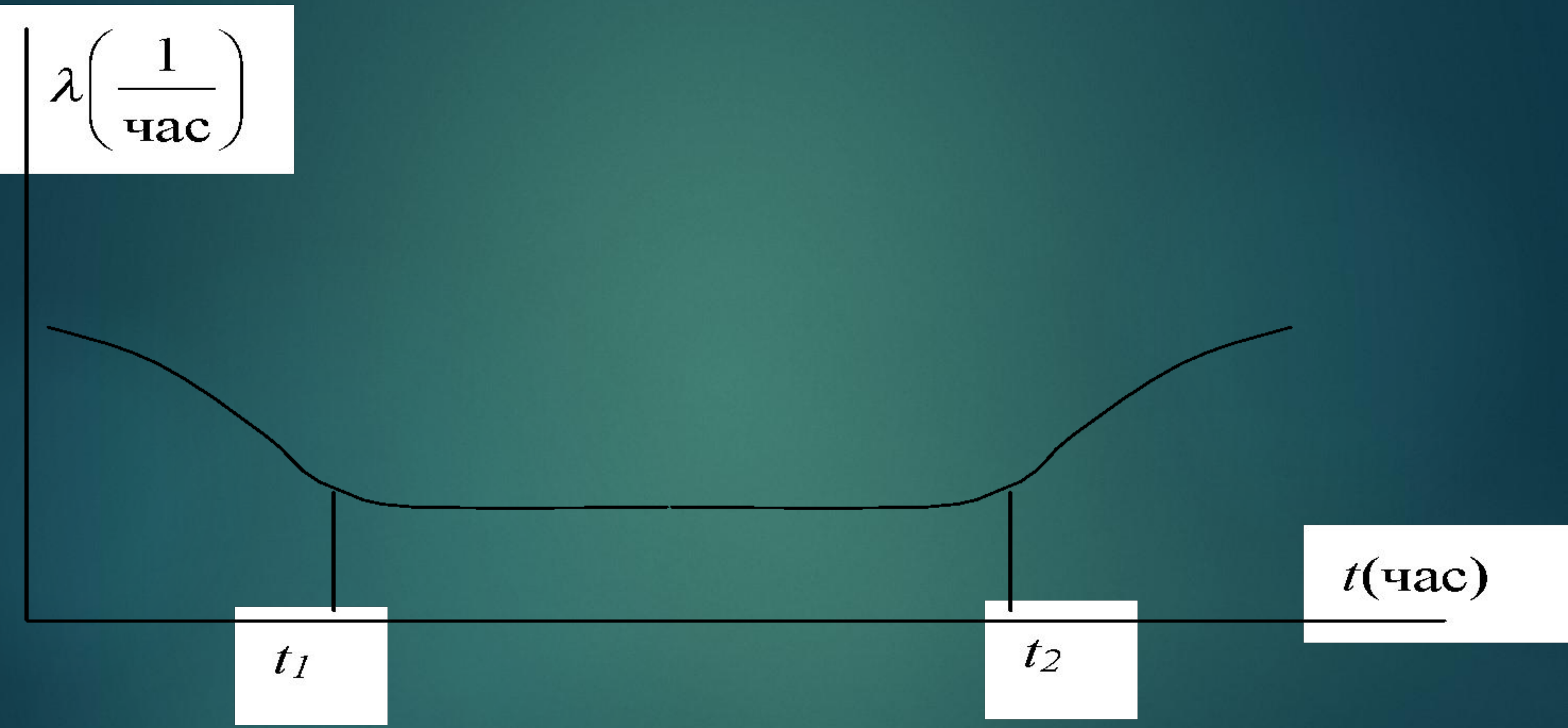


Рис.2. Типичная кривая интенсивности отказов.

Среднее время безотказной работы

Часто при расчетах пользуются характеристикой $T_{\text{ср}}$, которая представляет собой *математическое ожидание непрерывной неотрицательной случайной величины T – времени безотказной работы (наработки на отказ)* и называется *средним временем безотказной работы (средней наработкой на отказ)*.

Согласно определению математического ожидания непрерывной случайной величины

$$T_{\text{ср}} = M[T] = \int_0^\infty t q(t) dt = \int_0^\infty t \frac{dQ(t)}{dt} dt =$$

$$= -\int_0^\infty t \frac{dP(t)}{dt} dt.$$

Интегрируя по частям, получаем:

$$T_{\text{ср}} = -tP(t)\Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t)dt.$$

Первое слагаемое в этом равенстве

$$-tP(t)\Big|_0^{\infty} = -t[1-Q(t)]_0^{\infty} = \lim_{t\to\infty} t[1-Q(t)] = 0.$$

Это можно пояснить следующими рассуждениями. Вероятность отказа становится равной 1 уже при конечном (но достаточно большом) времени работы, следовательно, выражение $[1-Q(t)]=0$ уже при конечном t.

Таким образом, среднее время безотказной работы

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t)\,dt.$$

При $\lambda = const$ имеем

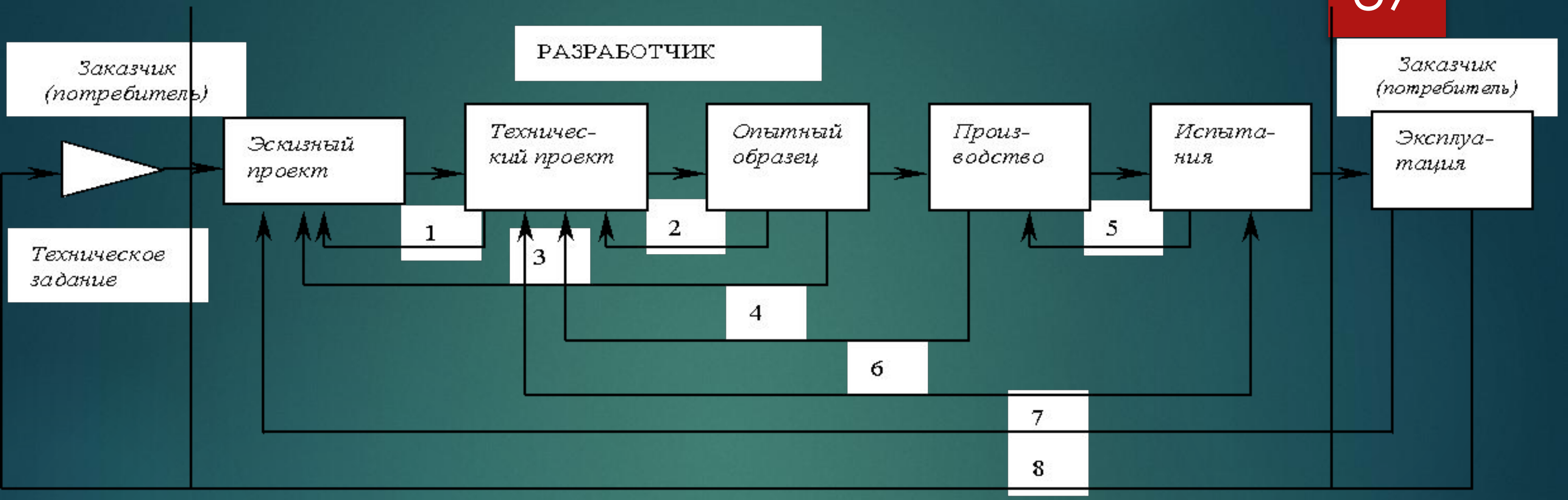
$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t)\,dt = \frac{1}{\lambda}. \qquad (15)$$

Статистически (на основании испытаний) среднее время безотказной работы можно оценить следующим образом

$$T_{\text{ср}} \approx \frac{1}{N}\sum_{\text{k}=1}^{N} t_{\text{k}}, \qquad (16)$$

где N – число однотипных элементов, над которыми проводятся испытания; t_{k} - время безотказной работы k-го элемента.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



Обозначения связей на схеме.
1 – корректировка (уточнение) идеи проекта по результатам разработки;
2 – корректировка технического решения;
3 – корректировка идеи проекта по результатам опытной реализации;
4 – корректировка технического решения по реальным характеристикам технологии;
5 – корректировка технологии производства;
6 – внесение изменений в разработку;
7 – предложения по модернизации разработки;
8 – предложения по разработке новых типов изделий.

Рис.3.Структурная схема процесса обеспечения надежности

В теории надежности рассматриваются объекты двух уровней сложности. Некоторый простейший (в пределах данного конкретного исследования) объект принято называть *элементом*.

Системой называется определенная совокупность элементов, взаимодействующих в процессе решения рассматриваемого круга задач и взаимосвязанных функционально.

Относительность понятий «элемент» и «система» ясна. Подразделение системы на элементы зависит от требуемой точности анализа, уровня наших представлений о системе и, наконец, от квалификации и даже технических и научных «вкусов» исследователя. Более того, объект, считавшийся системой в одном исследовании, может рассматриваться как элемент, если изучается система большего масштаба.

Абстрактное описание процесса функционирования объекта

Если отойти от конкретного содержания процесса функционирования технического объекта, то в простейшем случае может быть предложена следующая математическая модель этого процесса. В любой произвольный момент времени t элемент может находиться в одном из двух состояний: отказа и работоспособности. Введем для характеристики текущего состояния элемента в момент времени t индикатор

$$x(t) = \begin{cases} I, \text{ если элемент в момент } t \text{ работоспособен} \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Весь процесс функционирования можно представить чередующей последовательностью случайных величин $\xi_1, \eta_1, \quad \xi_2, \eta_2, \ldots, \xi_i, \eta_i$, где η_i - длительность *i*-го по счету периода отказа (в течение этого времени производится замена элемента или ремонт, если он в принципе возможен).

Понятно, что

$$x(t) = \begin{cases} I, \text{ если } t \in \xi_i, \\ 0, \text{ если } t \in \eta_i. \end{cases}$$

Рассмотрим теперь систему, состоящую из n элементов. Состояние системы в любой момент времени определяется состоянием отдельных ее элементов в этот момент. Если состояние i-го элемента системы в момент времени t обозначить через $x_i(t)$, то состояние системы можно записать в виде

$$X(t)=(x_1(t),\ldots,x_n(t)).$$

Определенным совокупностям состояний элемента соответствует состояние исправности системы в целом, т.е. $X(t)=\mathrm{I}$ (например, состояние $\mathrm{I},\mathrm{I},\ldots,\mathrm{I}$ всегда есть состояние исправности для системы). Другим совокупностям состояний элементов соответствует состояние отказа системы в целом, т.е. $X(t)=0$ (например, состояние $0,0,\ldots,0$ всегда есть состояние отказа для системы).

Все множество состояний системы принято называть *фазовым пространством состояний системы*.

В общем случае фазовое пространство не всегда является дискретным. Все зависит от того, рассматриваем ли мы дискретное или непрерывное фазовое пространство при исследовании надежности, всегда остается одна существенная сторона этого фазового пространства: она четко подразделяется на состояния двух типов – исправности и отказа.

Общие требования к показателям надежности

К показателям надежности, как и к любым показателям качества технических систем, представляется ряд естественных требований.

1. Показатель надежности должен быть измеримым, т.е. должна иметься возможность задавать его в количественном виде. Именно это позволяет априорно оценивать этот показатель, используя аналитические методы статистического моделирования, а также вырабатывать обоснованные рекомендации по рациональному повышению показателей надежности путем изменения структуры системы, принципов ее функционирования и технического обслуживания.

2. Показатель надежности должен допускать возможность экспериментальной (опытной) проверки во время специально проводимых испытаний или во время реальной эксплуатации.

3. Показатель надежности должен быть простым в физическом смысле и естественным с точки зрения оценки выполняемых технической системой функций.

4. Общее число показателей надежности, характеризующих техническую систему, должно быть небольшим. Однако использование одного единственного показателя надежности (особенно интегрального, в который входят, как в «свернутый критерий», целый ряд исходных показателей) может также оказаться неудобным.

5. Показатели надежности иногда целесообразно подразделить на внешние (оперативно- тактические) и внутренние (технические). Первые характеризуют эффективность и надежность собственно применения рассматриваемого объекта в целом, а вторые являются вспомогательными и служат в качестве параметров при оценке внешних показателей для систем более высокого уровня.

Невосстанавливаемый объект – такой, восстановление которого после отказа непосредственно во время функционирования считается полностью невозможным. Однако это не означает, что объекты данного типа вообще не могут ремонтироваться.

Восстанавливаемый объект – это такой объект, работа которого после отказа может быть возобновлена после проведения необходимых восстановительных работ. При этом восстановление не следует понимать узко как ремонт той или иной части объекта. В ряде случаев, говоря о восстановлении объекта, можно иметь в виду, что в случае отказа он полностью заменяется новым или другим, уже отремонтированным. В этом смысле некоторые объекты, являющиеся принципиально неремонтируемыми, могут рассматриваться как восстанавливаемые в указанном выше смысле. Имеется в виду, что выполнение функций (продолжение выполнения функций) при такой замене возможно.