

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
КАФЕДРА «ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

---

В. А. БУЛЫЧЕВ

# ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

КУЙБЫШЕВСКИЙ  
АВИАЦИОННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
1978

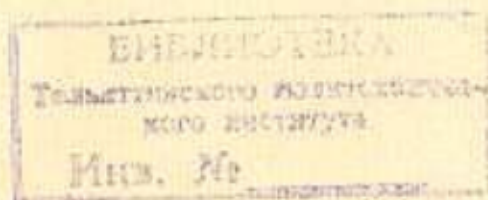
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
КАФЕДРА «ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

---

В. А. БУЛЫЧЕВ

# ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ 0501  
(ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ  
И ИНСТРУМЕНТЫ)



КУРЬЫШЕВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
1978

УДК 62—192:621.01

Изложены основные понятия теории надежности, рассмотрены показатели надежности и долговечности, методы оценки надежности при внезапных и постепенных отказах. Пособие базируется на разработанной в Тольяттинском политехническом институте программе курса «Основы надежности и машиностроения», читаемого студентам специальности 0501 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты».

Утверждено на Совете института 13 марта 1978 г.  
Темплан 1978, поз. 922.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Рост производительности труда и уровня автоматизации производства немислим без повышения надежности работы оборудования. За последние 10...15 лет сформировалась наука о надежности, изучающая причины снижения работоспособности машин с течением времени и разрабатывающая методы обеспечения долговечности изделий. Созданы ГОСТы на терминологию, показатели, методы расчета и контроля надежности изделий.

Надежность машины всегда являлась конечной целью работы конструктора, технолога, эксплуатационника, ремонтника. Традиционным способом создания надежной машины служат обеспечение запасов по прочности, жесткости, устойчивости, колебаниям и проведение широкого комплекса испытаний.

Наука о надежности пытается ответить на вопросы:

1. Сколько времени машина может работать без отказа?
2. Сколько отказов может возникнуть за определенное время?
3. Как спроектировать и изготовить машину, чтобы она имела оптимальную надежность?
4. Как эксплуатировать машину, чтобы ее производительность была максимальной.

Настоящее пособие не претендует на полноту изложения теории надежности. Его цель — дать студенту сведения об основных понятиях теории надежности и методах обеспечения надежности машин.

## 2. ПРИЧИНЫ ОБОСТРЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Практическая потребность в обеспечении и повышении надежности машин существовала с незапамятных времен, однако особенно эта проблема обострилась в 40-х годах XX века. Так,

по данным ВВС США, во второй мировой войне число потерянных от аварий самолетов превысило число боевых потерь, около 50% оборудования отказало еще на складе [11].

К основным причинам обострения проблемы надежности следует отнести

1. Рост сложности оборудования. Так, автоматическая линия изготовления коленчатых валов на ВАЗе состоит более чем из 100 единиц технологического и вспомогательного оборудования, работающего в тесной взаимосвязи.

2. Интенсивность режимов работы оборудования. Стремление к повышению производительности машины заставляет конструкторов закладывать в проекты новых изделий более высокие рабочие параметры (скорости, давления, температуры и т. п.). Так, при переходе на автоматизированное производство карданных подшипников на 1 ГПЗ многоспиральные токарные автоматы 1261М были заменены автоматами КА-76. При этом время цикла уменьшалось в 10 раз, а период между сменой или подналадкой инструмента — в 20 [1].

3. Сложность условий, в которых эксплуатируется оборудование. Современные машины должны работать в широком диапазоне температур, вибраций, климатических условий и т. п. Одно и то же оборудование в разных условиях эксплуатации имеет различную надежность.

4. Рост требований к качеству работы оборудования:

Петр I в указе тульским оружейникам (1706 г.) требовал точности изготовления до сотых долей дюйма (0,25 мм);

Ползунов И. И. в 1766 г. проверял зазоры в паровой машине екатерининским пятакон толщиной 6 мм [10];

уменьшение овальности и корсетности шеек коленчатого вала автомобиля с 10 до 6 мм увеличивает долговечность подшипников в 2,5...4 раза.

5. Повышение ответственности выполняемых функций (цена отказа):

одна минута простоя ВАЗа стоит 7 000 руб.;

расконтривание гайки болта (цена 4 цента) тяги рулевого управления самолета «Бонинг-707» привело к аварии при взлете [10];

отказ реле на электростанции в США в 1965 г. оставил 40 млн. человек на 10 часов без электроэнергии и привел к убыткам в 500 млн. долларов [12].

6. Автоматизация производства. При автоматизации человек исключается из непосредственного участия в процессе производства и непрерывного наблюдения за оборудованием. Системы

автоматического управления часто запрограммированы на заранее определенные воздействия и не реагируют на непредвиденные ситуации.

### 3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

В курсе теории надежности изучаются закономерности проявления массовых явлений, таких, как успешная работа изделия или его отказ, поэтому в ней широко используется аппарат теории вероятностей.

Рассмотрим основные понятия теории вероятностей [2].

#### 1. Частота случайного события.

Если при испытаниях  $n$  изделий некоторое событие  $A$  (отказ) проявилось  $k$  раз, то отношение  $k/n$  называется частотой случайного события  $A$ .

#### 2. Вероятность случайного события

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{k}{n} \right). \quad (1)$$

#### 3. Виды случайных событий:

а) несовместные. Их совместное проявление в одном испытании невозможно. Примером несовместных событий является попадание в мишень, разделенную на три зоны:  $A$ ,  $B$ ,  $C$

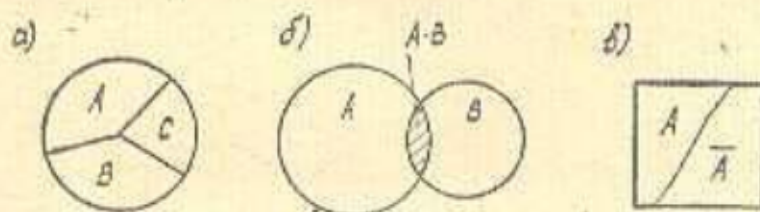


Рис. 1. Случайные события:  
а — несовместные; б — совместные; в — противоположные

(рис. 1, а). Вероятность попадания в зоны  $A$  и  $B$ :  $P(A) = 0,45$ ;  $P(B) = 0,35$ . Вероятность того, что при одном выстреле пуля попадает либо в зону  $A$ , либо в зону  $B$ :

$$P(A+B) = P(A) + P(B) = 0,8;$$

б) совместные. Появление одного из событий не исключает появления другого в одном и том же испытании. Например, испытываются изделия  $A$  и  $B$  (рис. 1, б). Вероятности их успешного испытания

$$P(A) = 0,8; P(B) = 0,7.$$

Какова вероятность успешного испытания хотя бы одного из

них —  $P(A+B)$ ? События  $A$  и  $B$  независимы и могут произойти совместно. Вероятность успешного испытания обоих изделий

$$P(AB) = P(A)P(B) = 0,8 \cdot 0,7 = 0,56.$$

Тогда

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(AB) = 0,8 + 0,7 - 0,56 = 0,94;$$

в) противоположные ( $A$  и  $\bar{A}$ ). Эти события образуют полную группу единственно возможных событий испытания (рис. 1, в). Примером является вероятность успешного испытания изделия  $P(A)$  или его отказ:

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1.$$

4. Закон распределения случайной величины. Для дискретной случайной величины (количество отказов изделия за определенное время) законом

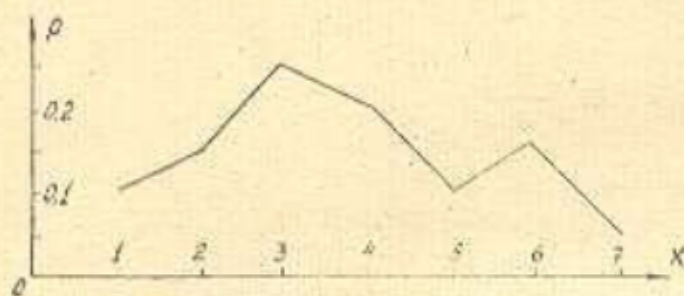


Рис. 2. Распределение случайной величины

распределения называется соответствие между возможными ее значениями и их вероятностями. Закон можно выразить в форме таблицы (табл. 1), графически (рис. 2) или аналитически.

Таблица 1

Величина $X$	1	2	3	4	5	6	7
Вероятность $P$	0,1	0,15	0,25	0,2	0,1	0,15	0,05

Для непрерывной случайной величины (время работы изделия до отказа) закон распределения можно выразить

а) интегральной функцией распределения.

Пусть  $x$  — действительное число. Вероятность события, состоящего в том, что случайная величина  $X$  примет значение меньше  $x$ , обозначим  $F(x)$ . Если  $x$  будет изменяться, то изменится и  $F(x)$ , т. е.  $F(x)$  есть функция  $x$ .

Интегральной функцией распределения называется функция  $F(x)$ , определяющая для каждого значения  $x$  вероятность того, что случайная величина  $x$  примет значение меньше  $x$ , т. е.

$$F(x) = \text{Вер} (X < x) = P(X < x). \quad (2)$$

Геометрически (рис. 3)  $F(x)$  есть вероятность того, что случай-

ная величина  $X$  примет значение, которое изображается на числовой оси левее точки  $x$ .

Свойства интегральной функции (рис. 4):

$0 \leq F(x) \leq 1$ , так как  $F(x)$  — вероятность (рис. 4 а);

$F(x_2) > F(x_1)$ , если  $x_2 > x_1$  [ $F(x)$  — неубывающая функция];

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1);$$

б) дифференциальной функцией распределения.



Рис. 3. Геометрическое представление интегральной функции распределения

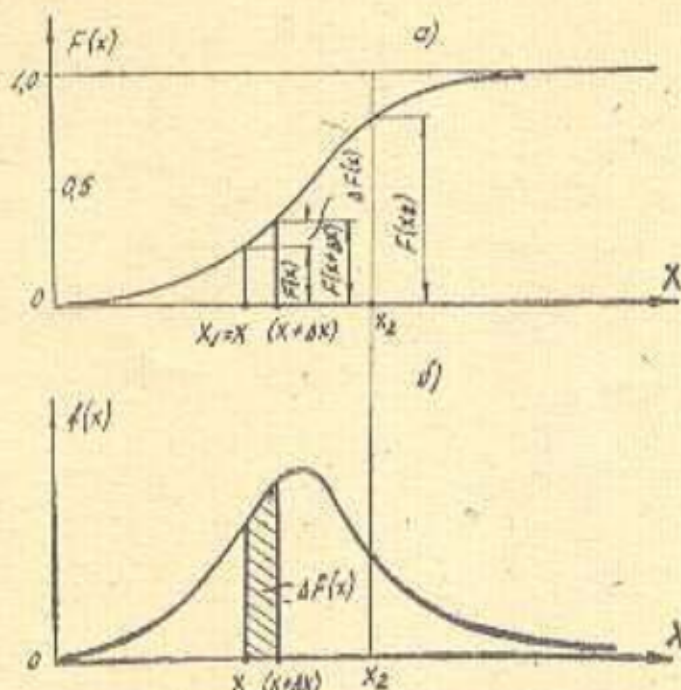


Рис. 4. Функции распределения: а — интегральная; б — дифференциальная

Рассмотрим изменение интегральной функции распределения  $F(x)$  при изменении аргумента на величину  $\Delta x$  (рис. 4, а):

$$F(x) = P(X < x), \quad (3)$$

$$F(x + \Delta x) = P[X < (x + \Delta x)]. \quad (4)$$

Отношение приращения функции к приращению аргумента

$$\frac{\Delta F(x)}{\Delta x} = \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x}. \quad (5)$$

Предел этого отношения

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta F(x)}{\Delta x} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = \frac{dF(x)}{dx} = \\ &= F'(x) = f(x) \end{aligned} \quad (6)$$

называется дифференциальной функцией распределения случайной величины, или плотностью распределения вероятности (рис. 4, б). Величина  $\Delta F(x) = f(x)\Delta x$  называется элементом вероятности и характеризует вероятность того, что случайная величина попадает в интервал  $(x; x + \Delta x)$ .

Свойства дифференциальной функции (рис. 4, б):



$f(x) > 0$ , т. е. не отрицательна;  $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$  (вероятность достоверного события, заключающегося в том, что величина  $X$  попадает в интервал  $\pm\infty$ , равна 1);  $P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$  (вероятность того, что случайная величина попадает в интервал  $(x_1, x_2)$ , равна площади под кривой плотности распределения вероятности для  $x_1 \leq X \leq x_2$ ).

Закон распределения, наиболее полно описывающий поведение случайной величины, практически часто неизвестен. В этом случае величина  $X$  может быть оценена числовыми характеристиками, определенными на основе статистической обработки экспериментальных данных. Наиболее часто используются следующие характеристики случайной величины:

Оценка математического ожидания (среднее значение):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} x_i \quad (7)$$

где  $n$  — объем выборки;

оценка среднеквадратического отклонения, характеризующая рассеивание случайной величины от среднего значения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}; \quad (8)$$

оценка коэффициента вариации, показывающая, насколько велико рассеивание по сравнению со средним значением случайной величины:

$$\mu = \frac{\sigma}{\bar{X}}. \quad (9)$$

Достоверность статистических оценок случайной величины зависит от объема выборки, поэтому статистические оценки случайной величины ( $\bar{X}$ ,  $\sigma$ ) лишь приближенно совпадают с вероятностными характеристиками генеральной совокупности — математическим ожиданием  $M(X)$  и дисперсией  $D(X)$ . В дальнейшем изложении все вероятностные характеристики оцениваются по их статистическим значениям.

#### 4. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ СМЫСЛ НАДЕЖНОСТИ

С математической точки зрения надежность можно определить как вероятность того, что действующая на объект нагрузка

ка  $R$  (механическая, тепловая, электрическая и т. п.) не превышает допустимых по условиям прочности  $S$  значений. В условиях эксплуатации прочность и нагрузка не постоянны, а колеблются относительно средних значений  $\bar{R}$  и  $\bar{S}$ . На рис. 5 приве-

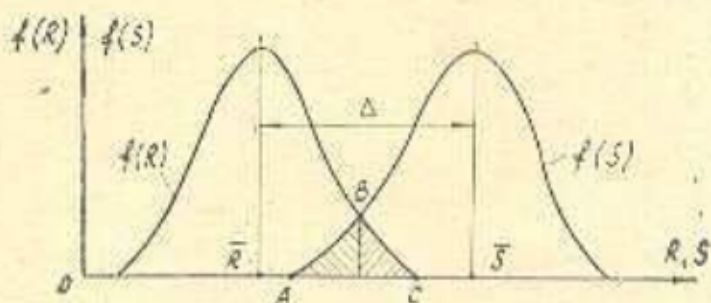


Рис. 5. Геометрическое представление надежности

лены плотности распределения нагрузки  $f(R)$  и прочности  $f(S)$ . Зазор  $\Delta$  характеризует средний запас прочности:

$$n = \frac{\bar{S}}{\bar{R}} = \frac{\bar{R} + \Delta}{\bar{R}} = 1 + \frac{\Delta}{\bar{R}}. \quad (10)$$

С вероятностной точки зрения надежность

$$\begin{aligned} P &= \text{Вер} (S > R) = \text{Вер} [(S - R) > 0] = \\ &= \text{Вер} \left[ R \left( \frac{S}{R} - 1 \right) > 0 \right] = \text{Вер} [R(n - 1) > 0]. \end{aligned} \quad (11)$$

Так как по условию  $R \neq 0$ , то

$$P = \text{Вер} (n > 1). \quad (12)$$

Таким образом, надежность представляет собой вероятность того, что запас прочности объекта  $n$  будет больше единицы.

Отказ объекта происходит, если распределения  $f(R)$  и  $f(S)$ , пересекаясь, образуют зону надежности ABC (рис. 5), в которой возможны неблагоприятные сочетания нагрузки и прочности, приводящие к отказу при  $R > S$ .

#### 5. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА МАШИНЫ ПО СКОРОСТИ ИХ ПРОТЕКАНИЯ

Во время работы машины в ней происходят обратимые (упругие деформации, нагрев и охлаждение) и необратимые (пластические деформации, коробление, износ, коррозия) процессы, которые влияют на технические характеристики машины и снижают качество ее работы.

По скорости протекания эти процессы можно разбить на три группы [8]:

1. Быстропротекающие, например, различные вибрации.

Их периодичность — доли секунды. Основными причинами вибрации являются:

изменение усилия резания за счет неустойчивости глубины резания (неравномерность припуска, точение по следу) и неравномерности подачи; изменение сил трения между стружкой и инструментом.

В результате действия этих переменных сил происходит изменение микрогеометрии поверхности и рассеивание

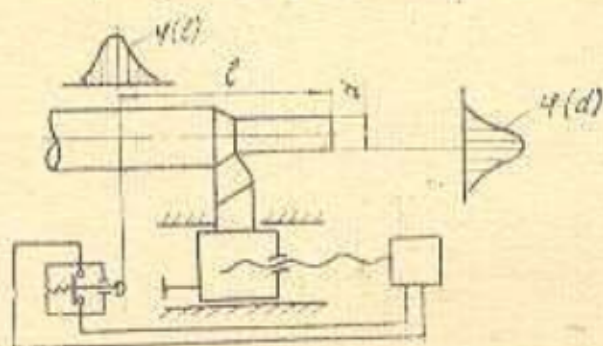


Рис. 6. Влияние быстропротекающих процессов на точность обработки

размеров обработанных деталей. На рис. 6 величина  $\varphi(d)$  характеризует плотность распределения вероятности получения диаметра  $d$ . Мгновенное рассеивание величины  $d$  обусловлено переменными силами резания, трения, износом инструмента и рядом других факторов.

Величина  $\varphi(l)$  характеризует плотность распределения размера  $l$  (рис. 6). Так, при точении валов на настроенном станке останов суппорта выполняется с помощью путевого датчика. За счет переменной силы трения скорость суппорта в момент окончания обработки для разных деталей партии не является постоянной, что приводит к рассеиванию величины  $l$ ;

неуравновешенность вращающихся узлов (рис. 7). Если центр тяжести заготовки не совпадает с осью вращения шпинделя на величину  $\varepsilon$ , то возникает центробежная сила

$$P_{ц} = m\omega^2\varepsilon, \quad (13)$$

где  $m$  — масса заготовки;

$\omega$  — угловая скорость.

Это приводит к изменению формы обработанной поверхности. При неодинаковой жесткости системы СПИД в направлении осей  $y$  и  $z$  погрешности формы в поперечном сечении будут иметь рассеивание, характеризуемое плотностями распределения вероятностей  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$ .

2. Протекающие со средней скоростью.

Их длительность измеряется минутами или часами. Эти процессы приводят к монотонному изменению начальных парамет-

ров машины. На рис. 8 показано изменение износа  $U$  ряда однотипных инструментов. Видно, что скорость износа  $du/dt$  для разных инструментов неодинакова. Поэтому время работы пар-

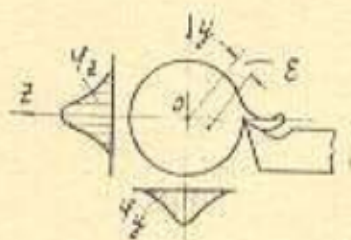


Рис. 7. Влияние неуравновешенности заготовки на точность обработки

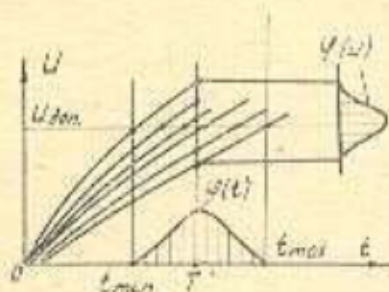


Рис. 8. Рассеивание стойкости партии инструментов

тии инструментов до допустимого износа  $U_d$  неодинаково и колеблется в пределах  $t_{max} \dots t_{min}$ . Распределение времени работы до  $U_d$  характеризуется плотностью вероятности  $\varphi(t)$ . Видно также, что в момент  $t=T$  ( $T$  — средняя долговечность) разные инструменты имеют неодинаковый износ, характеризуемый плотностью вероятности  $\varphi(u)$ .

### 3. Медленно протекающие.

Эти процессы протекают за время работы машины между периодами осмотра или ремонта. К ним относятся износ сопрягаемых поверхностей деталей машины, перераспределение остаточных напряжений, ползучесть, коррозия и т. п. Скорость этих процессов для однотипных машины имеет значительное рассеивание.

## в. ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МАШИНЫ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ

Рассмотрим суммарное действие процессов различной скорости на точность обработки на станке.

Схема изменения точности  $\Delta$  от времени показана на рис. 9. Каждый станок имеет начальную неточность обработки  $\Delta_0$ , связанную с его изготовлением и сборкой. Для партии станков величины  $\Delta_0$  неодинаковы и имеют рассеивание, характеризуемое плотностью  $\varphi_0$ .

Во время работы станка быстропротекающие процессы приводят при обработке партии деталей к рассеиванию размеров, описываемому плотностью  $\varphi_1$ . В результате точность обработки уменьшится на величину  $\Delta_1(t)$ .

Под влиянием процессов средней скорости происходит смещение центра группирования А и дальнейшее увеличение рассеивания размеров (по закону с плотностью  $\varphi_2$ ). В результате

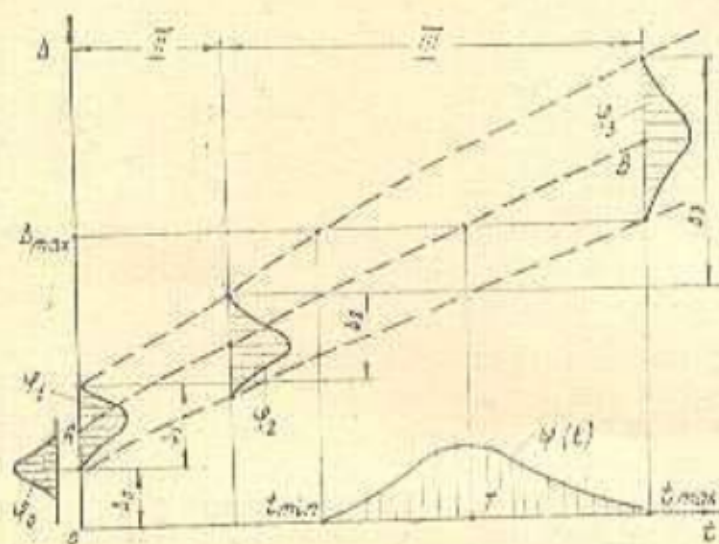


Рис. 9. Схема изменения точности машины с течением времени

точность обработки уменьшится на величину  $\Delta_2(t)$ . Под влиянием медленно протекающих процессов центр группирования размеров партии деталей смещается в точку В; величина рассеивания характеризуется плотностью  $\varphi_3$ , что приводит к дальнейшему уменьшению точности обработки на величину  $\Delta_3(t)$ .

Суммарная погрешность обработки в момент  $t$  будет складываться из отдельных составляющих с учетом их рассеивания:

$$\Delta_{\Sigma}(t) = \Delta_0 + \Delta_1(t) + \Delta_2(t) + \Delta_3(t). \quad (14)$$

Погрешность обработки на станке достигнет предельного значения  $\Delta_{\max}$  в среднем через отрезок времени  $t=T$ . Для разных станков момент достижения предельного значения  $t_1$  неодинаков и колеблется от  $t_{\min}$  до  $t_{\max}$ . Величины  $t_1$  образуют распределение долговечности (по точности обработки) с плотностью вероятности  $\varphi(t)$ .

Таким образом, при работе станка постепенно ухудшаются параметры, характеризующие его качество и работоспособность.

## 7. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Каждая наука для объяснения своих законов вводит ряд специфических понятий. Применительно к теории надежности они определены в [3]. ГОСТ 13377—75 рассматривает пять

групп терминов: объекты, состояния, события, свойства, показатели надежности. Рассмотрим эти понятия.

## I. Объекты

Объекты (изделия) делятся на две категории восстанавливаемые: автомобиль, станок, приспособление, инструмент (перетачиваемый) и другие изделия многоразового применения и невосстанавливаемые: объекты одноразового использования (пули, снаряды, ракеты), а также изделия, для которых после отказа восстановление технически невозможно или экономически нецелесообразно (электрическая лампочка).

## II. Состояния

ГОСТ выделяет пять видов состояний:

1. Исправное — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД), например, деталь, изготовленная в соответствии с требованиями чертежа и технологии; станок, соответствующий нормам точности, жесткости, производительности.

2. Неисправное — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных НТД, например, станок, у которого разбито стекло защитного ограждения или нарушено покрытие, т. е. признаком неисправного состояния является несоответствие объекта требованиям НТД в отношении второстепенных параметров, характеризующих удобство эксплуатации, внешний вид изделия.

3. Работоспособное — состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных НТД. Для того чтобы судить о работоспособности изделия, в НТД должны быть четко определены его функции и значения заданных параметров.

Понятие исправность шире, чем понятие работоспособность. Работоспособный объект может быть неисправным. Например, станок считается неисправным, если он не соответствует нормам хотя бы одного из параметров, установленных НТД (в то же время этот станок может быть работоспособным, если обрабатываемая деталь получается годной); инструмент, не обеспечивающий заданной стойкости, что приводит к частым остановкам для его замены или подналадки; автомобиль с повышенным расходом топлива.

4. Неработоспособное — состояние объекта, при котором значение хотя бы одного из заданных параметров, характеризу-

ющих способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным НТД. Например, станок не обеспечивает заданной точности или шероховатости обрабатываемой поверхности. Тем самым он не выполняет заданной функции, не выдерживает заданные параметры в пределах допуска, т. е. находится в неработоспособном состоянии. При обработке на этом же станке других, менее точных деталей он может быть признан работоспособным.

5. Предельное—состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за снижения эффективности эксплуатации, по соображениям техники безопасности или из-за необходимости проведения ремонта.

Критерии предельного состояния (износ, снижение точности обработки, вибрация) должны быть установлены в НТД.

### III. События

Нормальная эксплуатация изделия может быть нарушена из-за повреждения или отказа. Повреждение — событие, заключающееся в нарушении исправности объекта. Отказ—событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

Взаимосвязь между состояниями и событиями показана на рис. 10, из которого видно, что повреждение — это событие, отделяющее исправное состояние от неисправного. Критерием

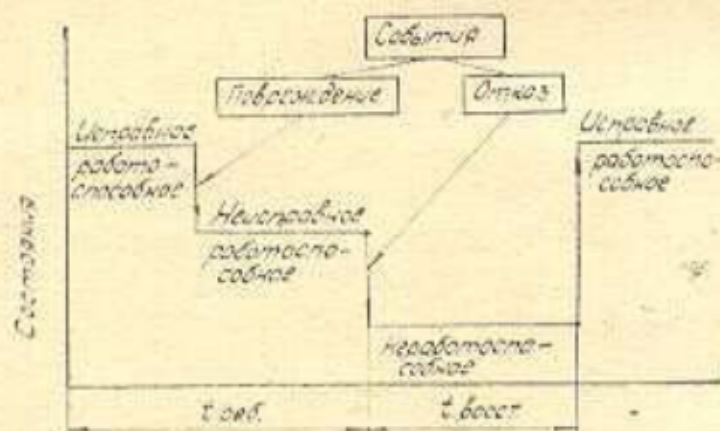


Рис. 10. Взаимосвязь событий и состояний изделий

такого разделения является выполнение всех требований НТД. Для определения исправности изделия в НТД необходимо привести перечень требований к изделию и предусмотреть возможность визуальной или инструментальной проверки их выполнения.

Неисправное изделие может быть работоспособным.

Отказ — это событие, отделяющее работоспособное состояние от неработоспособного. Критерием такого разделения является выполнение изделием всех заданных функций, при этом параметры изделия должны быть в пределах допусков. Следовательно, для того чтобы судить о работоспособности изделия или его отказе, в НТД должен быть приведен перечень функций, выполняемых изделием, и допусков его параметров. Применительно к станкам признаками отказа могут быть преждевременная замена инструмента при наличии системы плановой замены — отказ по стойкости; погрешность обработки превышает допуск — точностной отказ; цикл обработки больше допустимого — станок не обеспечивает производительности; не работает система подачи СОЖ или удаления стружки — отказ функционирования системы.

Таким образом, факт работы изделия еще не является критерием его работоспособности. В табл. 2 приведена классификация отказов по ряду признаков.

Таблица 2

Классификация отказов

Признак классификации	Вид отказа	Примеры
1 Характер процесса проявления отказа	Внезапный	Поломка вала из-за усталостной трещины
	Постепенный	Вибрация шпинделя из-за износа подшипника
2 Связь с другими отказами	Независимый	Износ инструмента
	Зависимый	Увеличение шероховатости поверхности
3 Время существования	Сбой	Вибрация шпинделя при движении транспорта рядом со станками
	Перебегающий отказ	Брак по размеру при обработке детали с повышенным припуском
4 Причина возникновения отказа	Конструкторский	Неправильный выбор основной схемы, запаса прочности, материала
	Производственный	Нарушение технологии обработки или ремонта
	Эксплуатационный	Нарушение правил и условий эксплуатации



#### IV. Свойства

Эффективность каждого изделия может быть оценена целым рядом показателей, характеризующих его технический уровень (производительность, коэффициент полезного действия, степень автоматизации, трудоемкость изготовления, себестоимость продукции и т. п.) и позволяющих оценить степень конструктивно-технологического совершенства изделия на стадии проектирования. Однако потребителя интересуют не только эти начальные свойства изделия, но и скорость их изменения в процессе работы, т. е. эксплуатационные свойства изделия. ГОСТом 13377—75 определяются пять важнейших эксплуатационных свойств изделий.

1. Надежность — свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Из определения видно, что надежность изделия зависит от целого ряда факторов (рис. 11), среди которых важнейшим яв-

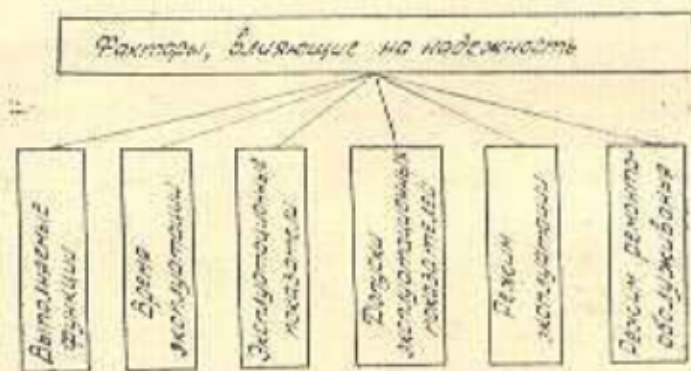


Рис. 11. Факторы, определяющие надежность изделия

ляется время эксплуатации. Во многих случаях недоразумения или разногласия между изготовителем и потребителем вызваны отсутствием четкости в определении выполняемых изделием функций, эксплуатационных показателей и их допусков, а также режимов и условий эксплуатации. Прежде чем сравнивать надежность однотипных инструментов или станков, надо выяснить, нет ли различия в выполняемых функциях (черновая или чистовая обработка), эксплуатационных показателях (производительность в см<sup>3</sup>/мин, стойкость, точность, стоимость), режи-

мах и условиях эксплуатации. В табл. 3 показано влияние условий эксплуатации на относительную частоту отказов  $K$  радиоэлектронного оборудования. Величина  $K$  может быть названа коэффициентом условий эксплуатации ( $n, n_{\text{лаб}}$ —количество отказов в реальных и лабораторных условиях эксплуатации).

Таблица 3

№ п/п.	Условия эксплуатации	$K = n/n_{\text{лаб}}$
1	Лаборатория	1
2	Автомобиль	50
3	Самолет	100

В табл. 4 в качестве примера приведены факторы, определяющие надежность элементов системы СПИД. Из нее видно, например, что надежность инструмента зависит от выполняемых функций, режима ( $v, s, t$ ) и условий эксплуатации (система замены и снабжения инструментом). В зависимости от указанных факторов и должны быть установлены эксплуатационные показатели, среди которых важнейшими являются стойкость  $T$  и точность обработки  $\delta$ .

Таким образом, надежность характеризует способность изделия выполнять заданные функции в течение определенного времени с заданными показателями качества работы изделия.

2. Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки. Главным в понятии безотказность является факт непрерывной работы изделия заданное время без вынужденной остановки на техническое обслуживание (ТО) или ремонт. Примером изделий, для которых безотказность является основным требованием, служат электрическая лампа, ракета, авиационный двигатель, вся военная техника. Безотказность не исключает необходимость ремонта или ТО, но все виды ремонтнообслуживания должны выполняться в плановом порядке в заранее определенное время.

Применительно к технологии машиностроения безотказность инструмента при его работе на автоматической линии обеспечивается плановой сменой инструмента после обработки определенного количества деталей. Во многих случаях эта замена эко-

Элементы системы СПИД (изделия)		станок		
Факторы, определяющие надежность изделия	деталь-шестерня (при эксплуатации)	инструмент	примпособление	
Выполнение Функции	Привод { неревверсивный { реверсивный	Обработка одной или нескольких поверхностей	1. Специально сконструированное 2. Переналаживаемое	1. Обра- ботка { черновая { чистовая 2. Количество обрабаты- ваемых поверхностей Годы
Время экс- плуатации	Месяцы, годы	Минуты, часы	Месяцы, годы	Годы
Эксплуата- ционные по- казатели	1. Скорость 2. Нагрузка 3. Срок службы между ремонтами $t_p$ 4. Стойкость ремонта $C_p$	1. Стойкость $T$ 2. Точность, $\delta$ 3. Стойкость, изгото- вления инструмента $S_i$ 4. Стойкость обработ- ки $S_o$	1. Точность базирова- ния и закрепления $\delta$ 2. Износостойкость $T$ 3. Стойкость $S$	1. Производительность, $Q$ 2. Точность ( $\delta$ ) 3. Стойкость обработ- ки $S_o$ 4. Время обслужива- ния и ремонта $t_{рем}$
Пределы экс- плуата- ционных показателей	1. $V < [V]$ 2. $M_{кр} \approx [M_{кр}]$ 3. $t_p \approx [t_p]$ 4. $C_p \approx [C_p]$	1. $T \approx [T]$ 2. $\delta \approx [\delta]$ 3. $C \approx [C]$ 4. $C_o \approx [C_o]$ $V, S, t$	1. $\delta < [\delta]$ 2. $T \approx [T]$ 3. $C_o < [C_o]$	1. $Q > [Q]$ 2. $\delta \approx [\delta]$ 3. $C_o \approx [C_o]$ 4. $t_p < [t_p]$ $V, S, t$
Режим экс- плуатации	$V$ { постоянная { переменная $M_{кр}$ { постоянный { переменный	1. За- мена { по необхо- димости плановая 2. Пе- реточка { станочник центральзо- ванная	1. Усилие закрепления 2. Усилие резания	1. Количество рабочих смен 2. Система ремонтно- обслуживания 3. Метод получения точности
Условия экс- плуата- ции	1. Периодическая или принудительная смазка 2. Кратковременная или постоянная ра- бота	1. За- мена { по необхо- димости плановая 2. Пе- реточка { станочник центральзо- ванная	1. Количество рабочих смен 2. Метод очистки от стружки 3. Система ремонтнооб- служивания	1. Количество рабочих смен 2. Система ремонтно- обслуживания 3. Метод получения точности

номически более выгодна, чем замена инструмента после поломки и связанного с этим непланового простоя автоматической линии.

3. Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и ремонтов.

Для оценки долговечности изделия необходимо установить признаки предельного состояния (максимальный износ, вибрации, снижение точности, производительности, экономичности, безопасности работы), назначить количественные значения этих признаков (допуски), определить систему ремонтнообслуживания.

В настоящее время в машиностроении применяются три вида ремонтнообслуживания:

1) система планово-предупредительных ремонтов (ППР);

2) система ремонта по потребности (РПП);

3) комбинированная система (применяется на ВАЗе). Практика показывает, что долговечность изделий существенно зависит от принятой системы ремонтнообслуживания. Например, долговечность инструмента зависит от качества переточки.

Различие между понятиями безотказность и долговечность поясним на примере работы авиационного двигателя и автоматической линии:

линия имеет большую долговечность (более 10 лет двухсменной работы) и малую безотказность (10...30 минут безостановочной работы между отказами);

авиационный двигатель имеет относительно малую долговечность (500...3000 часов наработки) и высокую безотказность в течение полета.

4. Ремонтпригодность — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин его отказов, повреждений и устранению их последствий проведением ремонтов и ТО.

Ремонтпригодность закладывается при проектировании. На этом этапе конструктор должен думать об удобстве замены быстроизнашивающихся деталей, частоте и трудоемкости ремонтов, количестве запасных частей за период эксплуатации. Недостаточная проработка этих вопросов приводит к значительным потерям времени при эксплуатации изделия. Так, в комбайне СК-4 64 узла требуют (по инструкции завода) ежедневной смазки, на что должно уходить до 25% сменного времени [10]. Основные требования к ремонтпригодности изложены в [9].

5. Сохраняемость — свойство объекта непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Сохраняемость характеризует способность объекта противостоять отрицательному влиянию условий хранения и транспортировки на его безотказность и долговечность. Сохраняемость является важнейшим требованием, предъявляемым к таким системам, которые постоянно находятся в состоянии дежурства и в любой момент должны быть готовы к использованию (вооруженные силы, пожарная охрана, скорая медицинская помощь и их техника).

Требования сохраняемости особенно важны для продуктов, лекарств, химических источников тока, вооружения и т. п. Сохраняемость радиоэлектронной аппаратуры существенно зависит от условий транспортировки. Например, по американским инструкциям на транспортировку по железной дороге систем управления ракет, оборудование должно выдержать без отказа падение (в контейнере) на бетонную плиту с высоты 600 мм. Для оценки сохраняемости телевизоров все они проходят в рабочем состоянии испытание на вибростенде, имитирующее условия транспортировки. После испытания телевизор должен быть исправным.

Рассмотренные пять свойств позволяют сделать ряд выводов: 1) наиболее важным свойством изделия является надежность; 2) надежность — комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать в себя безотказность  $B$ , долговечность  $D$ , ремонтпригодность  $P$  и сохраняемость  $C$ . Соотношение между этими свойствами можно условно выразить в виде

$$H = f(B, D, P, C);$$

3) для ремонтируемых изделий надежность включает в себя в основном только их безотказность, т. е.  $H \approx B$ ; 4) для ремонтируемых объектов одним из важнейших свойств, составляющих надежность, является ремонтпригодность. Например, для гибкой автоматической линии с достаточно емкими бункерами, станки которой имеют низкую безотказность, но высокую степень ремонтпригодности, частые отказы станков не снижают производительности линии, так как восстановление отказавших станков происходит быстрее, чем исчерпываются запасы изделий в бункерах.

Надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость представляют собой часть более общего понятия — качества продукции. ГОСТ 15467—70 [4] определяет качество продукции «как совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением».

Для оценки качества изделия необходимо определить назначение изделия и выполняемые им функции (кратковременная или постоянная работа, постоянная или переменная нагрузка и т. п.); количественные критерии пригодности изделия к использованию (номинальные значения рабочих параметров и их допуски); совокупность свойств, от которых зависит качество (применяемые материалы, трудоемкость изготовления, себестоимость, время и объем ТО и ремонта и т. п.).

Так, качество инструмента зависит от его назначения (обрабатываемого материала, режимов резания), критериев пригодности (допустимый износ), экономических факторов (себестоимость, трудоемкость).

Отличие качества от надежности:

1. Качество изделия зависит от совокупности свойств (качества сырья, надежности оборудования, технологического процесса). В свою очередь, надежность зависит от безотказности, долговечности. Поэтому понятие качества шире понятий безотказности и долговечности. Условно это можно представить в виде неравенства:

$$K > N > D$$

2. Качество характеризуется совокупностью первоначальных и временных показателей. К показателям первой группы относятся конструктивно-технологические параметры изделия (мощность, скорость, производительность и т. п.). Они служат для оценки машины на стадии проектирования и изготовления. Показатели второй группы (Н, Б, Д, Р, С) характеризуют временные свойства изделия и служат для определения эксплуатационных свойств машины.

Качество «растает» при эксплуатации (рис. 12). Чем ниже скорость изменения качества  $\Delta k / \Delta t$ , тем выше надежность. Надежность — это качество, изменяющееся во времени, это параметр, характеризующий динамику качества.

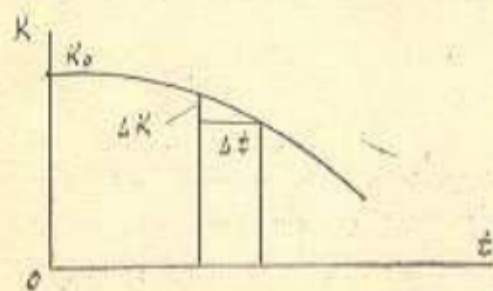


Рис. 12. Схема изменения качества изделия

## 8. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

ГОСТ 13377—75 дает не только качественное определение надежности как свойства изделия выполнять заданные функции в заданных условиях эксплуатации, но и целый ряд количественных показателей надежности.

### 1. Показатели безотказности

1. Вероятность безотказной работы  $P(t)$ . На рис. 13 показаны результаты испытаний 10 однотипных изделий. Крестиком

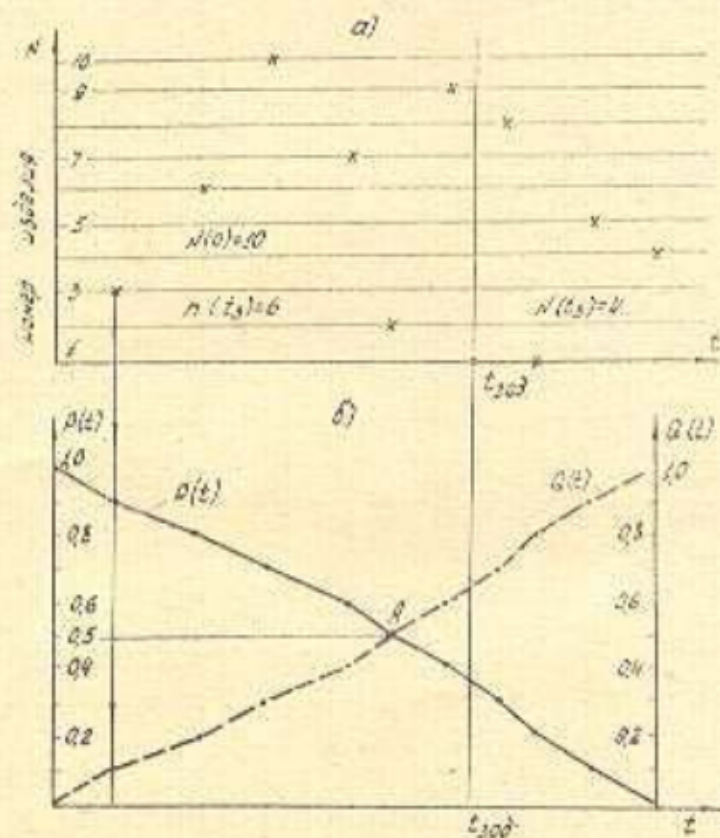


Рис. 13. Изменение надежности партии изделий:

а — результаты испытаний; б — изменение вероятности безотказной работы и вероятности отказа

обозначен момент отказа изделия (рис. 13, а). Время работы изделия до отказа  $t_p$  является случайной величиной.

Вероятность безотказной работы (ВБР) — вероятность того, что в пределах заданной наработки  $t_{зад}$  отказ изделия не произойдет:

$$P(t) = \text{Вер}(t_p > t_{зад}).$$

Количественно ВБР может быть определена как отношение числа работоспособных изделий  $N(t)$  к их общему количеству:

$$P(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = \frac{N(0) - n(t)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t)}{N(0)}, \quad (15)$$

где  $n(t)$  — количество отказавших к моменту  $t_{\text{зад}}$  изделий; в нашем случае  $P(t) = 0,4$ .

На основе рис. 13, а может быть построен график изменения ВБР (рис. 13, б). Эта зависимость называется статистической функцией надежности, или кривой убыли. Она характеризует скорость изменения ВБР. При  $t=0$   $P(0)=1$ ; при  $t \rightarrow \infty$   $P(\infty)=0$ .

Так как исправность и отказ являются противоположными событиями, то сумма их вероятностей равна единице. Поэтому вероятность отказа — вероятность того, что изделие откажет до момента  $t_{\text{зад}}$ :

$$Q(t) = \text{Вер}(t_p < t_{\text{зад}}) = 1 - P(t) = \frac{n(t)}{N(0)}. \quad (16)$$

Из определения вероятности отказа следует, что величина  $Q(t)$  является функцией распределения времени безотказной работы и может быть определена по данным эксплуатационной статистики. Из рис. 13, б видно, что кривая  $Q(t)$  — это зеркальное отражение кривой  $P(t)$  относительно координатных осей, проходящих через точку симметрии А, где  $P(t) = 0,5$ .

2. Средняя наработка до отказа  $T_1$  — это математическое ожидание (среднеарифметическое значение) наработки объекта до первого отказа.

На рис. 14 показаны результаты испытания  $N$  изделий. Если за время испытаний все изделия отказали, т. е.  $n(t) = N$ , то

$$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}. \quad (17)$$

Если испытания проводятся до определенного времени  $t_{\text{зад}}$  и к этому времени часть изделий  $(N-n)$  не отказала, то

$$T_1 = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^n t_{pi} + t_{\text{зад}}(N-n) \right]. \quad (18)$$

Величина  $T_1$  характеризует безотказность невосстанавливаемого изделия.

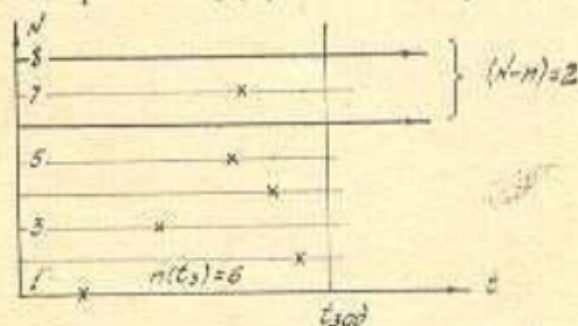


Рис. 14. Схема к расчету средней наработки до отказа



3. Нарботка до отказа  $T_0$  — отношение наработки восстанавливаемого изделия к математическому ожиданию числа его отказов  $n$  в течение этой наработки:

$$T_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{pi} \quad (19)$$

4. Интенсивность отказов  $\lambda(t)$ . На рис. 15 показаны результаты испытаний  $N$  невозстанавливаемых изделий. К случайному

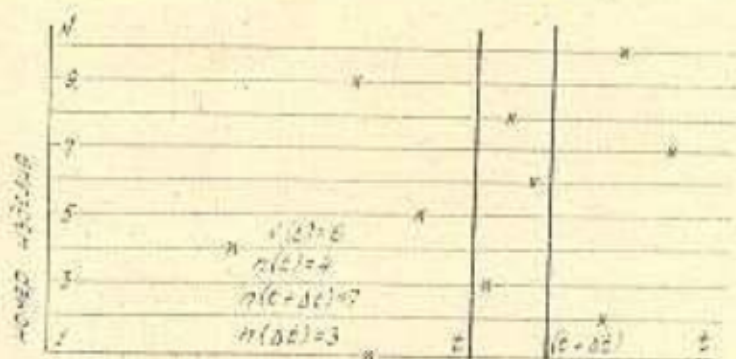


Рис. 15. Схема к расчету интенсивности отказов и параметра потока отказов

моменту времени  $t$  отказало 4 изделия; к моменту  $(t+\Delta t)$  — 7. Тогда за время  $\Delta t$  количество отказавших изделий

$$n(\Delta t) = n(t+\Delta t) - n(t) = 7 - 4 = 3.$$

Величина  $\frac{n(\Delta t)}{\Delta t}$  характеризует число отказов в единицу времени, т. е. среднюю скорость наступления отказов. Тогда величина

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t)\Delta t} = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t}, \quad \frac{1}{\text{час}} \quad (20)$$

представляет собой число отказов в единицу времени, приходящихся на одно работоспособное (к моменту  $t$ ) изделие. Эта величина является статистической оценкой интенсивности отказов.

Интенсивность отказов есть вероятность того, что невозстанавливаемое изделие, проработавшее безотказно до момента  $t$ , откажет в последующую единицу времени.

Величина  $\lambda$  является отношением числа отказавших за время  $\Delta t$  изделий к числу изделий, работавших к моменту  $t$ . Если время безотказной работы изделия значительно больше 1 часа, то величина  $\lambda$  характеризует вероятность отказа за 1 час.

На рис. 16 показан типичный график  $\lambda = f(t)$ . На нем можно выделить три участка:

I. Участок приработки. В начале работы отказывают некачественно сделанные изделия с дефектами, не обнаруженными

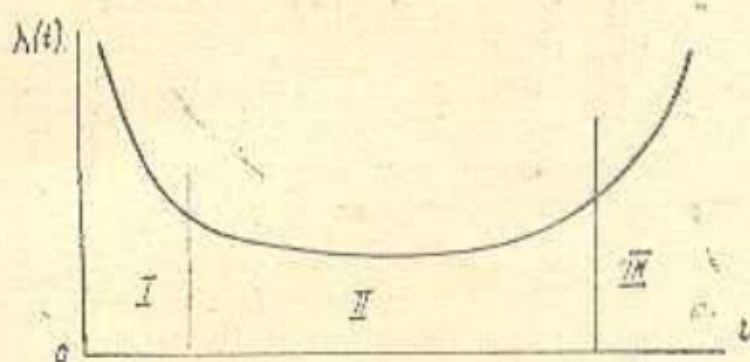


Рис. 16. Изменение интенсивности отказов изделия

при изготовлении и контроле (скрытый брак). Для ответственных изделий технологией должна быть предусмотрена заводская обкатка для обнаружения некачественных изделий и устранения производственных дефектов.

II. Участок нормальной эксплуатации. На этом участке  $\lambda \approx \text{const}$ . Отказы проявляются внезапно в моменты возникновения случайных пиковых нагрузок. Эти моменты не зависят от наработки, поэтому на участке II вероятность отказа в единицу времени (т. е. величина  $\lambda$ ) приблизительно постоянна.

III. Участок резкого увеличения числа отказов за счет износа, старения и других необратимых процессов. Это участок постепенных (износных) отказов.

5. Параметр потока отказов  $\omega(t)$ . На рис. 15 показаны результаты испытаний  $N$  восстанавливаемых изделий; отказавшие

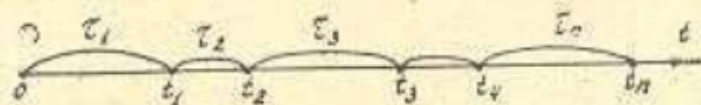


Рис. 17. Поток отказов восстанавливаемого изделия

изделия заменяются новыми, т. е.  $N(t) = \text{const}$ . Моменты наступления отказов изделия (рис. 17):

$$t_1 = \tau_1,$$

$$t_2 = \tau_1 + \tau_2,$$

$$t_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$$

образуют поток отказов.

Величина  $\frac{n(\Delta t)}{\Delta t}$  характеризует среднюю скорость наступления отказов в интервале  $\Delta t$ , а величина

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(o) \Delta t} = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(o) \Delta t}, \quad \frac{1}{\text{час}} \quad (21)$$

называется оценкой параметра потока отказов и представляет собой количество отказов восстанавливаемого изделия в единицу времени, приходящихся на одно изделие.

Величина  $\omega(t)$  является оценкой плотности вероятности отказа восстанавливаемого изделия, т. е. характеризует частоту отказов. Если  $\Delta t = 1$  ч., то  $\omega(t)$  представляет собой оценку вероятности отказа восстанавливаемого изделия за 1 час.

### III. Показатели долговечности

Ранее долговечность была определена как свойство объекта сохранять работоспособность до предельного состояния. Для измерения долговечности используются две группы показателей:

А. Показатели, измеряемые наработкой, т. е. объемом выполненной работы, — ресурсы.

1. Средний ресурс — оценка математического ожидания ресурса

$$T_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (22)$$

где  $t_i$  — ресурс  $i$ -го изделия из партии  $N$  изделий. На рис. 18 приведена кривая плотности распределения ресурса партии изделий.

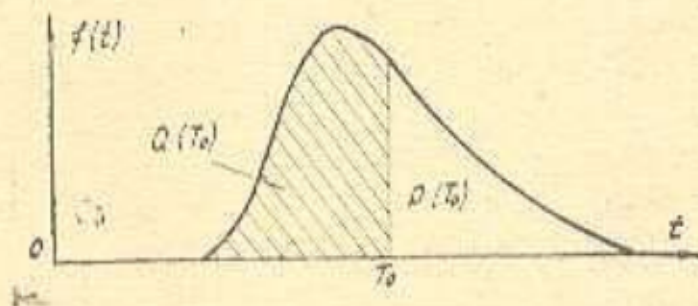


Рис. 18. Схема к расчету среднего ресурса

Видно, что к моменту  $t = T_0$  значительная часть изделий отказала (их доля показана штриховкой). Ордината, проходящая через точку  $t = T_0$ , делит все изделия партии на две части:

а) изделия, ресурс которых больше  $T_0$ ; доля этих изделий характеризует надежность партии:

$$P(T_0) = \text{Вер}(t > T_0) = \int_{T_0}^{\infty} f(t) dt;$$

б) изделия, ресурс которых меньше  $T_0$ ; доля этих изделий характеризует ненадежность партии:

$$Q(T_0) = \text{Вер}(t < T_0) = \int_0^{T_0} f(t) dt.$$

Если в технической документации указан средний ресурс  $T_0$ , то потребитель должен быть готов к тому, что значительная часть изделий не доработает до этого ресурса (для симметричных кривых  $f(t)$  эта часть составит 50%). Для ответственных изделий средний ресурс недостаточно характеризует фактическую долговечность. Для этих изделий долговечность характеризуется гамма-процентным ресурсом.

2. Гамма-процентный ресурс  $T_\gamma$  — наработка, в течение которой изделие не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ . Величина  $\gamma$  представляет собой вероятность безотказной работы партии изделий:

$$P(t_\gamma) = \gamma.$$

Ей соответствует незаштрихованная площадь под кривой плотности распределения ресурса (рис. 19). Тогда заштрихованная

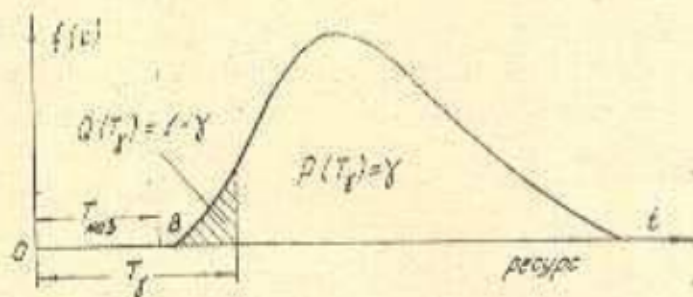


Рис. 19. Схема для определения гамма-процентного и назначенного ресурса

часть соответствует вероятности отказа  $Q(t_\gamma) = 1 - \gamma$ , т. е. характеризует долю отказавших к моменту  $T_\gamma$  изделий.

Определение  $T_\gamma$  производится на основе соглашения между потребителем и изготовителем. Так, в подшипниковой промышленности  $\gamma = 90\%$ . Это означает, что 90% подшипников должны проработать не менее заданного ресурса, а 10% могут отказаться до этого времени. Для большинства изделий машиностроения гамма-процентный ресурс пока не установлен.

3. Назначенный ресурс  $T_{нас}$  — суммарная наработка изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Для изделий особо ответственного назначения (авиационный, ракетный двигатели и т. п.) отказ в течение работы недопустим. Исходя из требований безотказности, величина  $T_{нас}$

должна быть левее точки  $B$  (рис. 19), т. е. до момента начала возникновения отказов. Это требование существенно ограничивает долговечность, но зато дает уверенность, что до момента  $T_{\text{наз}}$  отказ не произойдет.

Б. Показатели, измеряемые календарным временем эксплуатации,—сроки службы.

Срок службы не связан с наработкой, в него входит нерабочее время (ремонт, выходной, организационный простой и т. п.).

1. Средний срок службы — оценка математического ожидания срока службы

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{ср}i}$$

Это средняя календарная продолжительность эксплуатации изделия до предельного состояния, оговоренного в технической документации.

2. Гамма-процентный срок службы  $T_{\text{ср}\gamma}$  — календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой изделие не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью. По аналогии с гамма-процентным ресурсом (рис. 18, б) величина  $T_{\text{ср}\gamma}$  характеризует срок службы, который имеют и превышают  $\gamma\%$  изделий.

Сроки службы и ресурсы различаются по периодичности (до среднего, капитального ремонта, до списания).

Преимуществом использования сроков службы для оценки долговечности является простота их определения, недостатком — отсутствие связи с объемом выполненной работы (наработкой).

### III. Показатели ремонтпригодности

1. Вероятность восстановления в заданное время—вероятность того, что время восстановления работоспособности не превысит заданного:

$$P(t_n) = \text{Вер}(t_n < t_{\text{зад}}).$$

На рис. 20, а показана типичная зависимость плотности вероятности восстановления  $f(t_n)$ . Величина  $f(t_n)$  характеризует распределение времени восстановления; видно, что отказы с малым временем восстановления встречаются часто, т. е. имеют большую плотность; серьезные отказы, требующие большого времени восстановления, встречаются значительно реже. Величина

$$dP(t_n) = f(t_n) dt$$

представляет собой элемент вероятности, т. е. вероятность того, что изделие будет восстановлено за время  $dt$ . Тогда вероятность восстановления за время  $t_B$  определится из уравнения:

$$P(t_B) = \text{Вер}(t_B < t_{\text{зад}}) = \int_0^{t_B} f(t_B) dt. \quad (23)$$

Величина  $P(t_B)$  является интегральной функцией распределения времени восстановления (рис. 20, б). С увеличением  $t_{\text{зад}}$  величина  $P(t_B)$  асимптотически стремится к 1.

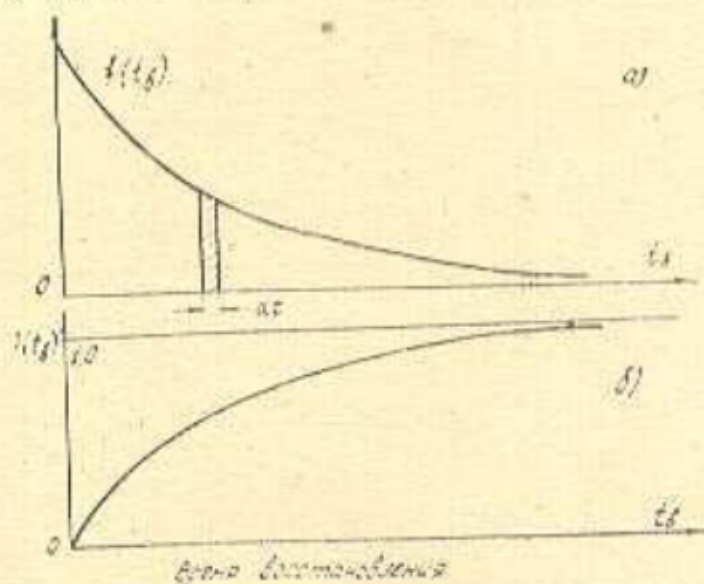


Рис. 20. Функции восстановления:  
а — дифференциальная; б — интегральная

2. Среднее время восстановления — математическое ожидание времени восстановления работоспособности:

$$T_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{v_i}, \quad (24)$$

где  $n$  — общее число восстановлений.

Величина  $T_B$  существенно зависит от ремонтнопригодности изделия, т. е. от его приспособленности к обнаружению и устранению отказа. Так, для ряда автоматических линий механосборочного производства ВАЗа среднее время устранения отказа оборудования  $T_B = 2...3$  ч., среднее время замены отказавшего инструмента  $T_B = 5...10$  мин.

#### IV. Показатели сохраняемости

1. Гамма-процентный срок сохраняемости  $T_{\text{ср}}$  — срок сохраняемости, который будет достигнут изделием с заданной веро-

ятностью  $\gamma$ . Величина  $T_{\text{ср}}$  аналогична по своему смыслу и методу определения гамма-процентному ресурсу (рис. 19).

2. Средний срок сохраняемости  $T_c$  — оценка математического ожидания срока сохраняемости.

## V. Комплексные показатели надежности

Надежность зависит от целого ряда свойств (Б, Д, Р, С). Показатель, определяемый не одним, а двумя и более свойствами, называется комплексным.

1. Коэффициент готовности  $\eta_r$  — это отношение суммарной наработки изделия за  $N$  периодов работы (и восстановлений) к сумме этой наработки и общего времени восстановления:

$$\eta_r = \frac{\sum_{i=1}^N t_{pi}}{\sum_{i=1}^N t_{pi} + \sum_{i=1}^N t_{vi}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{vi}} = \frac{T_p}{T_p + T_B} = \frac{1}{1 + \frac{T_B}{T_p}}, \quad (25)$$

где  $T_p$ ,  $T_B$  — наработка на отказ и среднее время восстановления.

Величина  $\eta_r$  показывает, какую долю рабочего времени оборудование используется по назначению, а не простаивает из-за непланового ремонта. Коэффициент готовности представляет собой вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов (на ремонт и ТО), в течение которых использование изделия по назначению не предусматривается. Для ряда автоматических линий механосборочного производства ВАЗа  $\eta_r = 0,7-0,8$ .

2. Коэффициент технического использования  $\eta_{\text{ти}}$  — это отношение суммарной наработки изделия за  $N$  периодов работы к сумме этой наработки, общего времени простоев из-за ремонтов (плановых и неплановых) и общего времени технического обслуживания (планового и непланового):

$$\eta_{\text{ти}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{pi}}{\sum_{i=1}^N t_{pi} + \sum_{i=1}^N t_{vi} + \sum_{i=1}^N t_{io}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{vi} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{io}} =$$

$$\eta_{\text{тн}} = \frac{T_p}{T_p + T_B + T_{\text{тн}}}, \quad (26)$$

где  $T_{\text{тн}}$  — среднее время технического обслуживания.

Величина  $\eta_{\text{тн}}$  характеризует потери рабочего времени по техническим причинам, т. е. степень использования оборудования (без учета простоев по организационным причинам). Для ряда автоматических линий механосборочного производства ВАЗа  $\eta_{\text{тн}} = 0,65 \dots 0,75$ .

3. Общий коэффициент использования  $\eta_0$ .

Кроме простоя по техническим причинам (ремонт, ТО), оборудование может простаивать по организационным причинам (отсутствие заготовок, инструмента, наладчика и т. п.). Если среднее время организационных простоев

$$T_{\text{орг}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{орг } i}$$

то

$$\eta_0 = \frac{T_p}{T_p + T_B + T_{\text{тн}} + T_{\text{орг}}}. \quad (27)$$

## 9. НАДЕЖНОСТЬ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОТКАЗАХ

Надежность — это вероятность того, что в течение заданной наработки отказ изделия не произойдет:

$$P(t) = \text{Вер}(t > t_{\text{заж}}) = \frac{N(t)}{N(0)},$$

где  $N(t)$  — количество исправных к моменту  $t$  изделий из общего числа  $N(0)$  работающих изделий.

На рис. 21 показан типичный график изменения надежности (кривая убыли). Рассмотрим изменение надежности в интервале  $\Delta t$ :

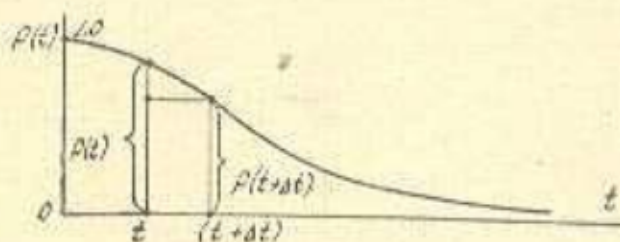


Рис. 21. Кривая убыли

$$P(t) = \frac{N(t)}{N(0)};$$

$$P(t + \Delta t) = \frac{N(t + \Delta t)}{N(0)}.$$

По определению, интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t) \Delta t}, \quad (28)$$



где  $n(t+\Delta t)$  и  $n(t)$  — число изделий, отказавших к моментам  $(t+\Delta t)$  и  $t$ :

$$\left. \begin{aligned} n(t) &= N(o) - N(t) = N(o) - P(t) \cdot N(o), \\ n(t+\Delta t) &= N(o) - N(t+\Delta t) = N(o) - P(t+\Delta t) \cdot N(o) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Подставим значения выражений (29) в формулу (28):

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{N(o) - P(t+\Delta t) \cdot N(o) - N(o) + P(t) \cdot N(o)}{N(t) \Delta t} = \\ &= -\frac{N(o) [P(t+\Delta t) - P(t)]}{N(t) \Delta t} = -\frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\frac{N(t)}{N(o)} \cdot \Delta t} = \\ &= -\left[ \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t} \right] \cdot \frac{1}{P(t)}. \end{aligned} \quad (30)$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой отношение приращения функции к приращению аргумента. Как известно из математического анализа, предел этого отношения называется производной функции.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[ \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t} \right] = P'(t) = \frac{dP(t)}{dt}.$$

Тогда 
$$\lambda(t) = -\frac{dP(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P(t)}. \quad (31)$$

Таким образом, интенсивность отказов  $\lambda(t)$  — это отношение скорости изменения надежности к самой надежности в этот же момент времени, взятое с обратным знаком.

Величину  $\lambda$  можно выразить через вероятность отказа:

$$Q(t) = 1 - P(t),$$

$$\lambda(t) = -\frac{d[1 - Q(t)]}{dt} \cdot \frac{1}{1 - Q(t)} = \frac{dQ(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P(t)}.$$

Но величина  $dQ(t)/dt = f(t)$ , т. е. плотности распределения вероятности времени безотказной работы (рис. 18).

Поэтому

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (32)$$

При малой наработке ( $t \ll T$ )  $P(t) \approx 1$ , тогда  $\lambda(t) \approx f(t)$ . С увеличением наработки надежность  $P(t)$  уменьшается, поэтому функции  $\lambda(t)$  и  $f(t)$  не совпадают.

Выражение (31) является дифференциальным уравнением первого порядка. Разделим переменные  $P(t)$  и  $\lambda(t)$ :

$$\lambda(t) dt = -\frac{dP(t)}{P(t)}.$$

Возьмем интеграл от обеих частей уравнения:

$$\int_0^t \lambda(t) dt = - \int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)} = - \ln P(t) \Big|_0^t = \\ = -[\ln P(t) - \ln P(0)].$$

Но при  $t=0$   $P(0) = 1$  (рис. 21), поэтому  $\ln P(0) = \ln 1 = 0$ .

Тогда

$$\ln P(t) = - \int_0^t \lambda(t) dt. \quad (32a)$$

Чтобы избавиться от логарифма, пропотенцируем обе части уравнения (32 а):

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right). \quad (33)$$

Полученная формула связывает надежность с интенсивностью отказов и является важнейшей в теории надежности. Из нее видно, что надежность изделия целиком определяется законом изменения интенсивности отказов во времени.

Для практики представляется интересным частный случай, когда

$$\lambda(t) = - \frac{dP(t)}{P(t)} = \lambda = \text{const}. \quad (34)$$

Это означает, что относительная скорость изменения вероятности безотказной работы с увеличением времени работы является величиной постоянной. Тогда уравнение (33) примет вид:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = \exp(-\lambda t). \quad (35)$$

Выражение (35) показано на рис. 22. Оно описывает надежность нестареющих изделий, отказы которых вызваны не износом и другими необратимыми явлениями, а «просачиванием» в эксплуатацию изделий со скрытыми дефектами, например поломка твердосплавного инструмента из-за трещины при пайке. Отказы таких некачественно изготовленных изделий происходят в случайные моменты возникновения пиковых нагрузок (неравномерная подача, повышенный припуск).

Условие  $\lambda = \text{const}$  означает, что надежность изделия не зависит от предшествующей наработки. Из выражения (35) следует,

что надежность одинакова для любых одинаковых промежутков времени  $t$ , т. е. при экспоненциальном законе вероятность отказа не зависит от предшествующей наработки (от «возраста»

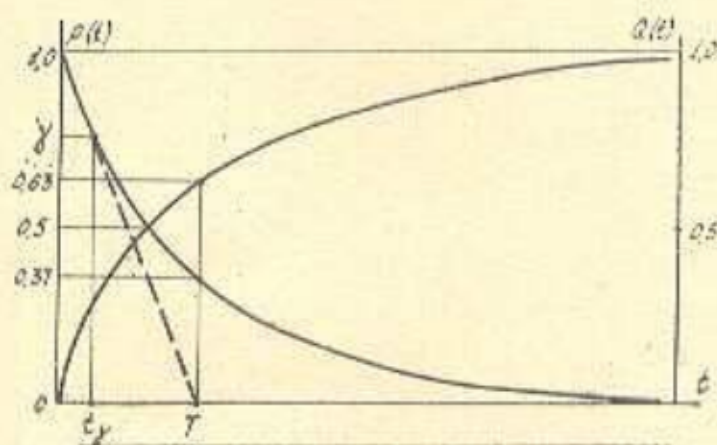


Рис. 22. Экспоненциальный закон изменения надежности

изделия). Это обстоятельство ограничивает область применения экспоненциального закона случаями, когда износом изделия за определенный период можно пренебречь. Например, долговечность автоматической линии обычно более 10 лет, а оценка ее надежности производится по данным отказов за 20...30 смен. На этом отрезке можно считать  $\lambda \approx \text{const}$ . Практика показывает [1], что надежность линий, состоящих из большого числа деталей, хорошо описывается экспоненциальным законом.

Плотность распределения вероятности безотказной работы при экспоненциальном законе определится из уравнения

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} = -\frac{d}{dt}(e^{-\lambda t}) = -(\lambda t)' e^{-\lambda t} = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (36)$$

Распределение  $f(t)$  показано на рис. 23. Оно имеет такой же экспоненциальный характер, как и кривая надежности

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda.$$

Площадь под кривой плотности  $f(t)$  принимается равной единице. Ордината, проходящая через точку В, делит площадь под кривой на две части:

правая соответствует вероятности безотказной работы (надежности):

$$P(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = \lambda \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t}; \quad (37)$$

левая — вероятности отказа (ненадежности):

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (38)$$

Вероятность отказа изделия за время  $\Delta t = t_2 - t_1$

$$Q(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda(t_2 - t_1)}. \quad (39)$$

Найдем величину  $T$  (средняя наработка до отказа) при экспоненциальном законе. В общем случае

$$T = \int_0^{\infty} t f(t) dt, \quad (40)$$

где

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}$$

— плотность вероятности безотказной работы.

Тогда

$$T = - \int_0^{\infty} t \frac{dP(t)}{dt} dt = - \int_0^{\infty} t P'(t) dt. \quad (41)$$

Возьмем интеграл (41) по частям:

$$\int U dV = UV - \int V dU. \quad (42)$$

В нашем случае

$$U = t, \quad dU = dt, \quad dV = P'(t) dt, \quad V = P(t).$$

Тогда

$$T = - \int_0^{\infty} t P'(t) dt = -tP(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (43)$$

Первый член выражения (43) равен нулю, так как  $p(0) = 1$ , а  $P(\infty) = 0$ .

$$tP(t) \Big|_0^{\infty} = \infty \cdot P(\infty) - 0 \cdot P(0) = \infty \cdot 0 - 0 \cdot 1 = 0.$$

Поэтому

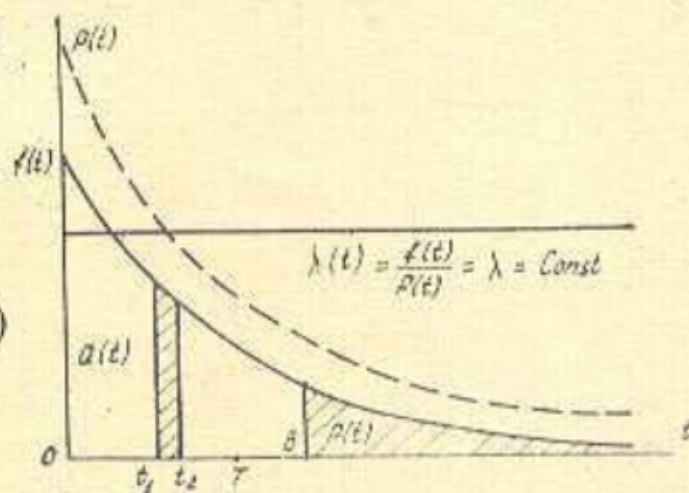


Рис. 23. Схема для определения интенсивности отказов при экспоненциальном законе надежности

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (44)$$

Таким образом, величина  $T$  численно равна площади под кривой убыли (рис. 21). Для экспоненциального закона  $P(t) = e^{-\lambda t}$

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (45)$$

Выражение (45) представляет собой табличный интеграл.

Для экспоненциального закона среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \frac{1}{\lambda}.$$

Поэтому коэффициент вариации

$$\mu = \frac{\sigma}{T} = 1.$$

Если по результатам эксплуатационной статистики отказов  $\mu = 0,8 \dots 1,2$ , то это свидетельствует о том, что распределение наработки изделия близко к экспоненциальному закону.

Из выражения (45) видно, что для экспоненциального закона надежности средняя наработка до отказа есть величина, обратная интенсивности отказов. Поэтому формулу (35) можно записать в виде

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{T}\right). \quad (46)$$

Оценим надежность, соответствующую средней наработке на отказ, т. е. при  $t = T$  (рис. 22):

$$P(T) = \text{Вер}(t > T) = \exp\left(-\frac{T}{T}\right) = \exp(-1) = e^{-1} \approx 0,37.$$

Это означает, что вероятность того, что изделие проработает безотказно больше средней наработки, составит всего 37%. Вероятность противоположного события (отказа)

$$Q(t) = \text{Вер}(t < T) = 1 - P(t) = 0,63.$$

Следовательно, при экспоненциальном законе 63% изделий откажут при наработке, меньше  $T$ . Величина  $T$  недостаточно характеризует долговечность, так как к этому времени откажут около  $2/3$  изделий. Высокая надежность ( $P > 0,8$ ) сохраняется только в течение небольшой наработки:  $t \ll T$  (рис. 20). На начальном участке кривую, описываемую выражением (35), можно приближенно заменить прямой. Разложим выражение (35) в ряд Маклорена:

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

при  $\lambda t \ll 1$

$$P(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t = 1 - \frac{t}{T}. \quad (47)$$

Анализ аварийных отказов оборудования некоторых автоматических линий механосборочного производства ВАЗа показал, что  $\lambda \approx 0,025$  1/час (без учета инструмента). Тогда надежность оборудования линии за 1 час

$$P(t=1) = 1 - \lambda = 0,975.$$

Надежность оборудования линии за 8 часов

$$P(t=8) = 1 - 8\lambda = 0,8.$$

Часто на практике необходимо определить гамма-процентный ресурс  $t_\gamma$ , т. е. наработку, в течение которой изделие не откажет с заданной вероятностью  $\gamma$ . Величина  $t_\gamma$  определится из соотношения:

$$P(t) = \text{Вер}(t > t_\gamma) = \gamma. \quad (48)$$

Для экспоненциального закона

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T}}.$$

Поэтому выражение (48) можно записать в виде

$$e^{-\frac{t_\gamma}{T}} = \gamma.$$

Отсюда после логарифмирования получим:

$$t_\gamma = -T \ln \gamma = T (-\ln \gamma). \quad (49)$$

В табл. 5 приведены величины  $(-\ln \gamma)$  для некоторых значений  $\gamma$ .

Таблица 5

$\gamma$	0,9	0,8	0,7	0,5	0,37
$-\ln \gamma$	0,1	0,22	0,36	0,69	1,0

Так, при  $\gamma = 0,9 - \ln \gamma = 0,1$ .

Рассмотрим пример. При  $T = 100$  ч. и  $\gamma = 0,9$   $t_\gamma = 10$  ч. Это означает, что, хотя среднее время до отказа  $T = 100$  ч., его достигнут и превзойдут только 37% изделий, а 90% гарантированно проработают только 10 часов. Таким образом, высокая надежность  $P(t) = \gamma = 0,9$  гарантируется только в течение 10 часов. Другими словами, чем выше требования к безотказности, тем жестче приходится ограничивать возможную долговечность изделия.

## 10. НАДЕЖНОСТЬ ПРИ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗАХ

На практике под отказом изделия часто понимается не только поломка объекта (внезапный отказ), но и случаи, когда выходной параметр изделия (точность, производительность, мощность и т. п.) постепенно выходит за допустимые пределы. Как правило, причиной таких постепенных отказов является износ рабочих поверхностей, поэтому в литературе такие отказы называются износowymi.

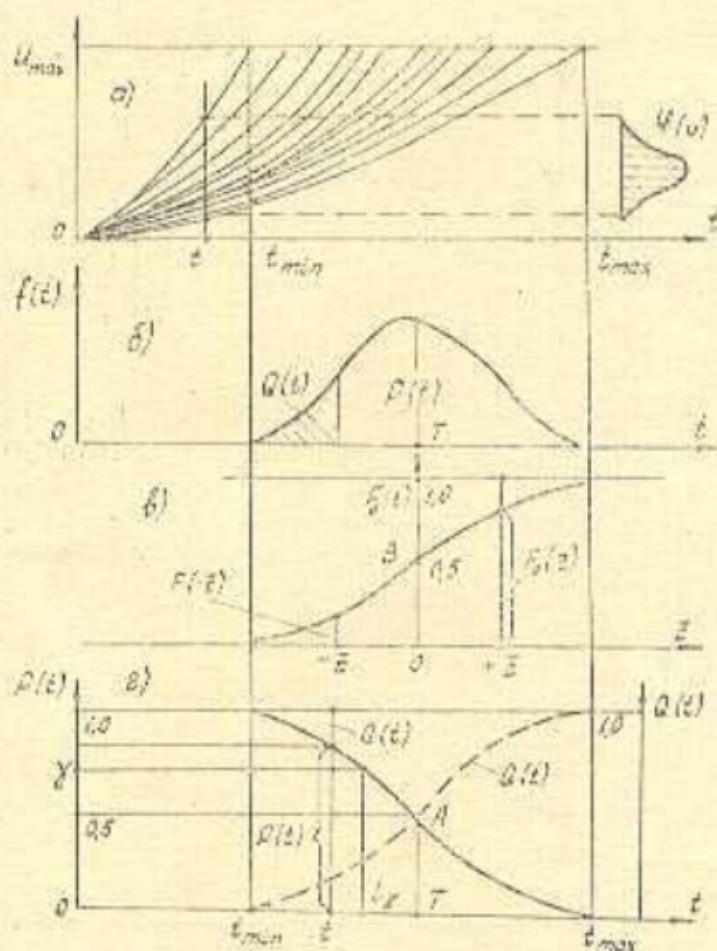


Рис. 24. Схема к расчету надежности при постепенных отказах:

- а — распределение износа сопряжения партии изделий;
- б — плотность распределения наработки до предельного износа;
- в — нормированная функция распределения наработки;
- г — изменение надежности при постепенных отказах.

На рис. 24, а показано распределение износа сопряжения партии изделий. Видно, что разные изделия достигают предельно допустимого износа  $U_{\max}$  в разное время. В случайный мо-

мент времени  $t$  распределение износа имеет плотность вероятности  $\varphi(u)$ . Нарботка изделий до величины  $U_{\max}$  изменяется в пределах  $t_{\max} \dots t_{\min}$  с плотностью  $f(t)$  (рис. 24, б).

Нормальный закон распределения наработки (закон Гаусса) является хорошей математической моделью постепенного отказа. Для нормального закона функция распределения

$$F(x) = \text{Вер}(x < x_{\text{зап}}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (50)$$

где  $\bar{X}$  — среднее значение параметра;  
 $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение.

При нормальном распределении случайная величина  $X$  может принимать и отрицательные значения. Однако, если коэффициент вариации  $\mu = \sigma/\bar{X} < 0,3$ , то вероятность получения отрицательного значения  $X$  мала, и ею можно пренебречь.

Так как величины  $X$  и  $\sigma$  могут изменяться в широких пределах, то выражение (50) необходимо нормировать, т. е. привести к стандартной форме. С этой целью введем безразмерную переменную

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma},$$

где  $z$  — стандартное отклонение от среднего значения, выраженное в долях  $\sigma$ .

Тогда нормированная функция распределения, т. е. ненадежность,

$$F_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (51)$$

График функции (51) показан на рис. 24, в. Из него видно, что функция  $F_0(z)$  симметрична относительно точки  $B(0; 0,5)$ . Для такой функции (нечетной)

$$F_0(-z) = 1 - F_0(z). \quad (52)$$

Так как  $F_0(z)$  — вероятность отказа (ненадежность), то вероятность противоположного события (надежность)

$$P(z) = 1 - F_0(z) = 1 - \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \int_z^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (53)$$

Учитывая соотношение (52), получаем:

$$P(z) = F_0(-z) = F_0\left(-\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right) = F_0\left(\frac{\bar{x} - x}{\sigma}\right). \quad (54)$$



Функция  $F_0(z)$  табулирована [2]. Если  $x=t$  — случайное время работы изделия до отказа, то  $x=T$  — наработка на отказ. Тогда

$$P(z) = F_0\left(\frac{T-t}{\sigma}\right). \quad (55)$$

Для примера в табл. 6 приведены некоторые значения функции  $P(z)$ .

Таблица 6

$z$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$P(z)$	0,5	0,69	0,84	0,93	0,98	0,99	0,998

Рассмотрим пример. Пусть наработка до отказа изделия имеет нормальное распределение с параметрами  $T=1000$  ч.,  $\sigma=200$  ч. Определить вероятность безотказной работы изделия за время  $t=600$  ч.,  $t_2=1200$  ч.

$$P(z_1) = F_0\left(\frac{T-t_1}{\sigma}\right) = F_0\left(\frac{1000-600}{200}\right) = F_0(2).$$

$$P(z_2) = F_0\left(\frac{T-t_2}{\sigma}\right) = F_0\left(\frac{1000-1200}{200}\right) = F_0(-1).$$

Из табл. 6 получим:

$$P(z_1) = P(t_1) = 0,98.$$

С учетом выражения (52)

$$P(z_2) = P(t_2) = F_0(-1) = 1 - F_0(1) = 1 - 0,84 = 0,16.$$

Если известно, что распределение наработки изделия подчиняется нормальному закону, то можно определить гамма-процентный ресурс  $t_\gamma$ , т. е. наработку, в течение которой изделие не откажет с заданной вероятностью  $\gamma$ . Из рис. 24, з видно, что наработки  $t_{\min}$  достигнут все 100% изделий. Нарботки  $T$  достигнут только 50% изделий.

Величина  $t_\gamma$  определяется из соотношения:

$$P(z) = F_0\left(\frac{T-t_\gamma}{\sigma}\right) = \gamma. \quad (56)$$

В общем случае

$$t_\gamma = T - U_\gamma \sigma, \quad (57)$$

где  $U_\gamma$  — коэффициент.

В табл. 7 приведены значения  $U_\gamma = f(\gamma)$ .

$\gamma$	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
$\sigma\gamma$	1,65	1,28	0,84	0,52	0,25	0	-0,25	-0,52

Рассмотрим пример.  $T=1000$  ч.,  $\sigma=200$  ч.,  $\gamma=0,9$ . Тогда  $t_{\gamma}=1000-1,28 \cdot 200=743$  ч. Это значит, что 90% изделий проработают не менее 743 часов, а 10% откажут к этому времени.

## 11. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ

Независимо от конструкции любое изделие (систему) можно представить в виде основного (последовательного) или резервного (параллельного) соединения элементов (рис. 25). Различие в структуре существенно влияет на надежность системы.



Рис. 25. Соединение элементов в систему:  
а — основное; б — резервное.

При основном соединении (рис. 25, а) отказ любого элемента приводит к отказу системы, например, цепь (отказ—обрыв любого звена цепи), автоматическая линия с жесткой межагрегатной связью (отказ любой позиции приводит к отказу всей линии) и т. п.

В реальной системе элементы не обязательно имеют цепную структуру и могут работать независимо (например, инструменты в позиции автоматической линии). Но отказ любого элемента приведет к отказу системы.

Из теории вероятностей известно: если отказ каждого элемента является независимым событием, то вероятность безотказной работы системы равна произведению вероятностей безотказной работы всех ее элементов:

$$P_{\text{посл}} = p_1 p_2 \dots p_n = \prod_{i=1}^n p_i. \quad (58)$$

Если

$$p_i = p, \text{ то } P_{\text{посл}} = p^n. \quad (59)$$

Так как  $p < 1$ , то с ростом количества элементов надежность быстро убывает. На рис. 26 показана зависимость (59) при  $p=0,99$ . Видно, что при  $n=10$   $P_{\text{посл}}=0,91$ , а при  $n=100$   $P_{\text{посл}}=0,37$ . Это

означает, что в последнем случае система будет работоспособной только 37% времени, хотя каждый ее элемент имеет высокую надежность. Таким образом, при последовательном соединении надежность системы всегда меньше надежности самого ненадежного элемента:

$$P_{\text{сист}} < (P_i)_{\text{min}}$$

Если отказ изделия недопустим, то одним из наиболее эффективных методов повышения надежности является резервирование, т. е. введение в систему избыточности (рис. 25, б). На рис. 27 элемент 1 является основным, т. е. минимально необходимым для выполнения заданных функций, а элементы 2, 3, ..., n — резервными и служат для обеспечения работоспособности системы в случае отказа основного элемента.

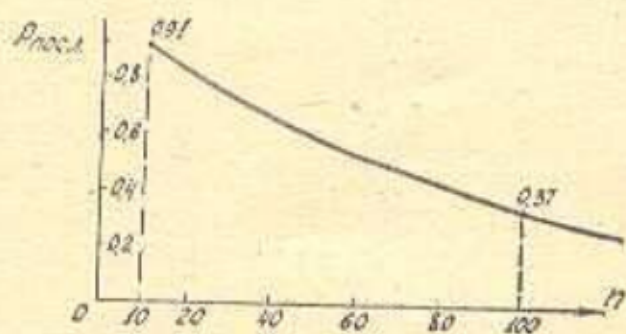


Рис. 26. Влияние количества элементов на надежность системы

Примерами резервирования являются двигатели многомоторного самолета (нагруженный резерв), тупиковый бункер-накопитель автоматической линии с гибкой межагрегатной связью (ненагруженный резерв), автоматическая замена инструмента после его износа, повторный контроль ответственных деталей и т. п.

Под кратностью резервирования понимается отношение числа резервных элементов к числу резервированных основных элементов. В нашем случае (рис. 27)

$$k = \frac{n-1}{1} = n-1.$$

Наиболее часто при резервировании используется дублирование, при котором  $n=2$ ,  $k=1$ . Условие отказа при дублировании — одновременный отказ 1-го и 2-го элементов.



Рис. 27. Схема резервирования

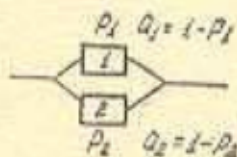


Рис. 28. Схема к расчету надежности дублированной системы

На основании теоремы умножения вероятностей, вероятность отказа системы параллельно соединенных элементов равна произведению вероятностей отказа отдельных элементов (рис. 28):

$$Q_{\text{пар}} = Q_1 \cdot Q_2 = (1 - P_1) (1 - P_2).$$

Тогда  $P_{\text{пар}} = 1 - Q_{\text{пар}} = 1 - (1 - P_1) (1 - P_2)$ .

При  $P_1 = P_2 = P$   $P_{\text{пар}} = 1 - (1 - P)^2 = 2P - P^2$ . Эффективность дублирования для повышения надежности можно оценить коэффициентом:

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{пар}}}{P} = 2 - P.$$

Рассмотрим пример. Если  $P = 0,9$ , то  $\varepsilon = 1,1$ , а  $P_{\text{пар}} = 1,8 - 0,81 = 0,99$ . Это означает, что введение дублирования повысило надежность с 0,9 до 0,99, т. е. на 10%.

Таким образом, резервирование является методом создания надежных систем из менее надежных элементов, так как:

$$P_{\text{сист}} = 0,99 > P_{\text{эле}} = 0,9.$$

Сравним надежность автоматической линии с жесткой и гибкой межагрегатной связью и одинаковым количеством позиций (рис. 29). Если надежность всех позиций одинакова и равна  $P$ , то для жесткой линии (рис. 29, а)

$$P_{\text{ж}} = P^n.$$

Бункеры-накопители делят линию на  $m$  участков (рис. 29, б). Число позиций на участке

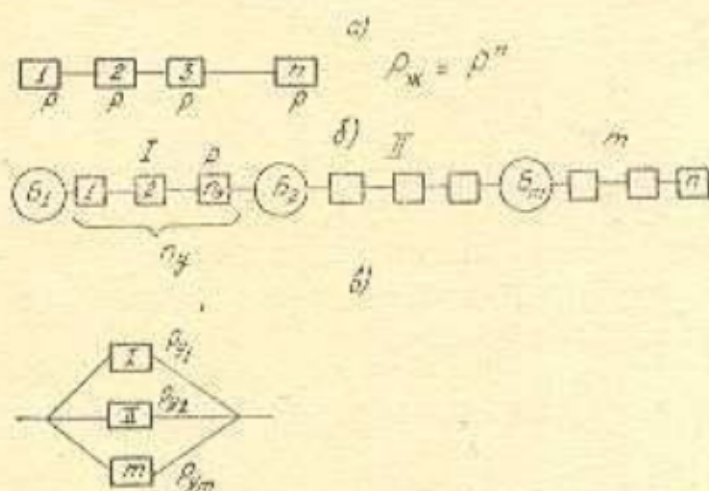


Рис. 29. Схема к расчету надежности автоматической линии:

- а — линия с жесткой межагрегатной связью;
- б — линия с гибкой связью;
- в — структурная схема линии с гибкой связью.

$$n_y = \frac{n}{m}.$$

Тогда надежность участка

$$P_y = P^{n_y} = P^{\frac{n}{m}}.$$

Бункеры делают работу участка независимой от отказа предыдущего участка, т. е. структура гибкой линии изменяется — из последовательного она превращается в параллельное соединение отдельных участков (рис. 29, в). Отказ линии произойдет, когда все участки одновременно не будут работать:

$$Q_r = Q_1 Q_2 \dots Q_m = \prod_{i=1}^m Q_{yi},$$

где ненадежность участка

$$Q_{yi} = 1 - P_{yi} = 1 - P^{\frac{n}{m}}.$$

Тогда надежность гибкой линии

$$P_r = 1 - Q_r = 1 - \left(1 - P^{\frac{n}{m}}\right)^m.$$

Оценим повышение надежности линии за счет бункеров-накопителей коэффициентом:

$$\varepsilon = \frac{P_r}{P_{ж}} = \frac{1 - \left(1 - P^{\frac{n}{m}}\right)^m}{P^n}.$$

Рассмотрим пример:  $n=12$ ,  $m=4$ ,  $p=0,9$ , тогда

$$\varepsilon = \frac{1 - (1 - 0,9^3)^4}{0,9^{12}} = \frac{0,999}{0,29} = 3,43.$$

Из сравнения видно, что жесткая линия из 12 индивидуально надежных станков обладает очень низкой надежностью ( $P_{ж}=0,29$ ). По сравнению с ней гибкая линия, разделенная бункерами на 4 участка, имеет высокую надежность ( $P_r=0,999$ ). Таким образом, введение резервирования в виде бункеров повышает надежность линии в 3,43 раза.

## 12. СВЯЗЬ НАДЕЖНОСТИ С ЗАПАСОМ ПРОЧНОСТИ

На рис. 30 показаны плотности распределения нагрузки  $f(R)$  и прочности  $f(S)$  детали. Средний коэффициент запаса прочности

$$\bar{K} = \frac{\bar{S}}{\bar{R}}.$$

Распределение нагрузки и прочности в партии деталей, характеризующее среднеквадратическими отклонениями  $\sigma_R$  и  $\sigma_S$ , мо-

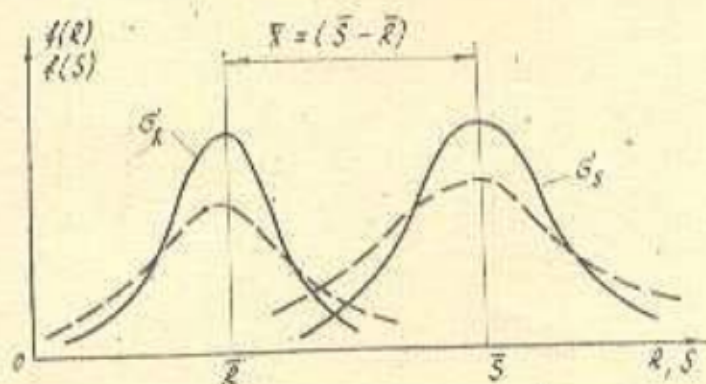


Рис. 30. Схема к расчету надежности через запас прочности

жет привести к разрушению (отказу) при  $R > S$ . Надежность, т. е. вероятность неразрушения, зависит от выполнения условия:

$$P = \text{Вер} (S > R) = P [(S - R) > 0] = P \left[ R \left( \frac{S}{R} - 1 \right) > 0 \right] = \\ = P [R (K - 1) > 0]. \quad (60)$$

Поскольку  $R \neq 0$ , то  $P = \text{Вер} (K > 1)$ , где  $K$  — фактический коэффициент запаса прочности. Из теории вероятностей известно: если величины  $x_1, x_2, \dots, x_n$  распределены по нормальному закону, то величина

$$y = \sum_{i=1}^n x_i$$

также распределена по нормальному закону с плотностью

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y - \bar{y})^2}{2\sigma_y^2}},$$

с параметрами

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i, \\ \sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{x_i}^2}.$$

На практике распределения величины  $R$  и  $S$  подчиняются нормальному закону. Поэтому их алгебраическая сумма

$$X = S - R \quad (61)$$

также будет распределена нормально с параметрами

$$\bar{X} = \bar{S} - \bar{R} = \bar{R} \left( \frac{\bar{S}}{\bar{R}} - 1 \right) = \bar{R} (\bar{K} - 1), \quad (62)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}. \quad (63)$$

Тогда вероятность неразрушения, т. е. надежность

$$P(x > 0) = \text{Вер}(K > 1) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \times \\ \times \exp \left[ -\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2} \right] dx. \quad (64)$$

Из теории вероятностей известно: если случайная величина  $X$  распределена нормально, то вероятность того, что  $X$  будет находиться в интервале  $(A, B)$ ,

$$P(A < X < B) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_A^B \exp \left[ -\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right] dx = \\ = \Phi \left( \frac{B - \bar{x}}{\sigma} \right) - \Phi \left( \frac{A - \bar{x}}{\sigma} \right), \quad (65)$$

где  $\Phi(z) = \int_0^z \exp \left( -\frac{z^2}{2} \right) dz$  — функция Лапласа.

В нашем случае  $A=0$ ,  $B=\infty$ . Тогда выражение (64) запишется так:

$$P(x > 0) = \text{Вер}(0 < x < \infty) = \Phi \left( \frac{\infty - \bar{x}}{\sigma_x} \right) - \Phi \left( \frac{0 - \bar{x}}{\sigma_x} \right) = \\ = 0,5 + \Phi \left( \frac{\bar{x}}{\sigma_x} \right) = 0,5 + \Phi \left( \frac{\bar{x}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \right). \quad (66)$$

Выразим величины  $\sigma_R$ ,  $\sigma_S$  через коэффициенты вариации:

$$\mu_R = \frac{\sigma_R}{\bar{R}}, \quad \mu_S = \frac{\sigma_S}{\bar{S}},$$

отсюда

$$\sigma_R = \mu_R \cdot \bar{R}, \quad \sigma_S = \mu_S \cdot \bar{S}. \quad (67)$$

Подставив значения выражений (67) и (62) в формулу (66), получим после преобразований:

$$P(x > 0) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{\bar{K} - 1}{\sqrt{\bar{K}^2 \mu_S^2 + \mu_R^2}} \right]. \quad (68)$$

Таким образом, найдена зависимость между надежностью, средним коэффициентом запаса прочности  $\bar{K}$  и рассеиванием прочности и нагрузки  $\mu_s, \mu_n$ . В реальных условиях эксплуатации величины  $\mu_s, \mu_n$  постоянны (обычно  $\mu < 0,3$ ).

Как видно из формулы (68), надежность, т. е. вероятность неразрушения, целиком зависит от среднего запаса прочности  $\bar{K}$ , т. е.

$$P(x > 0) = f(\bar{K}).$$

В табл. 8 приведены значения надежности, рассчитанные по формуле (68), для двух частных случаев:

$$\mu_n = \mu_s = \mu = 0,1 \text{ и } 0,3.$$

Таблица 8

$\bar{K}$	1,1	1,3	1,5	2	3	5	10
0,1	0,75	0,964	0,994	0,999			
0,3	0,46	0,73	0,82	0,93	0,95	0,99	0,999

Видно, что при  $K > 2$  увеличение запаса прочности (а следовательно, и веса деталей) не дает существенного прироста надежности. Таким образом, для повышения надежности надо не увеличивать запас прочности, а уменьшать рассеивание нагрузки и прочности, т. е. уменьшать величины  $\mu_s$  (задача технолога) и  $\mu_n$  (задача конструктора и эксплуатационника).

### 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАШИНЫ

Прежде чем определить оптимальную долговечность, необходимо установить критерий оптимальности. Им могут быть максимальная производительность, точность, минимальная себестоимость и т. п.

Определим оптимальную долговечность с точки зрения минимума себестоимости изготовления продукции [7]. Все затраты потребителя в зависимости от времени эксплуатации машины можно разделить на три группы:

1. Не зависящие от времени разовые затраты на приобретение машины:  $C_1 = A$  ( $A$  — цена машины).
2. Пропорциональные времени эксплуатации:  $C_2 = Bt$  (затраты на зарплату эксплуатирующего персонала, материалы, энергию, инструмент и т. п.). Величина  $B, \frac{\text{руб.}}{\text{час.}}$  характеризует удельные затраты в единицу времени (или на единицу продукции руб/шт).



3. Прогрессирующие затраты на ремонт:

$$C_3 = kt^n \text{ (обычно } n=1,5-2\text{),}$$

где  $k$  — стоимость ремонта, отнесенная к одному часу эксплуатации машины.

Тогда суммарные затраты за время эксплуатации

$$\Pi = A + Bt + kt^n, \quad (69)$$

Средняя себестоимость одного часа работы машины

$$C = \frac{\Pi}{t} = \frac{A}{t} + B + kt^{n-1}. \quad (70)$$

Величина  $C$  и три ее составляющие показаны на рис. 31. Из него видно, что себестоимость изменяется в зависимости от наработки.

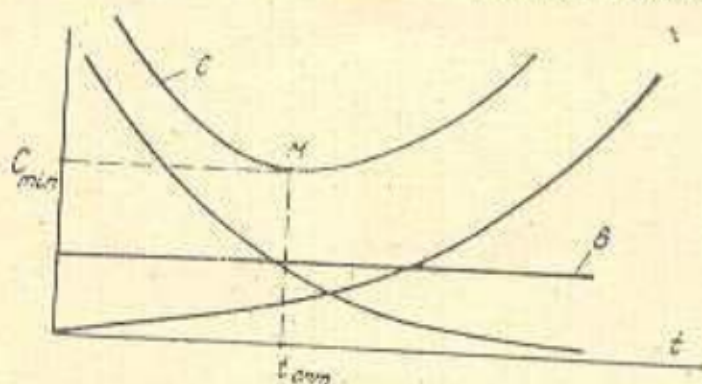


Рис. 31. Схема к расчету оптимальной (по себестоимости) долговечности машины

жения (70) и приравнять ее нулю:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{A}{t^2} + k(n-1)t^{n-2} = 0.$$

Отсюда

$$t_{opt} = \sqrt[n]{\frac{A}{k(n-1)}}. \quad (71)$$

Рассмотрим пример.

Стоимость новой машины  $A = 5000$  руб., удельная стоимость ремонта  $K = 0,05$  коп/час  $= 5 \cdot 10^{-4}$  руб/час, показатель роста стоимости ремонта во времени  $n = 2$ . Тогда  $t_{opt} = \sqrt{\frac{A}{K}} = 3160$  час.  $\approx 0,8$  года при двухсменной работе машины.

Затраты на ремонт за это время

$$C_3 = kt^2 = 5 \cdot 10^{-4} (3160)^2 = 5000 \text{ руб.}$$

Таким образом, оптимальная долговечность — это время, за которое расходы на ремонт становятся равными первоначаль-

ной стоимости машины. При дальнейшей эксплуатации ( $t > t_{opt}$ ) прогрессирующие расходы на ремонт приведут к увеличению себестоимости продукции.

Найдем теперь оптимальную долговечность машины с учетом стоимости запасных частей.

Рассмотрим следующую модель эксплуатации [5]:

1. За срок службы до списания  $T$  машина ремонтируется  $n$  раз (рис. 32).

2. Межремонтный срок службы  $t = \frac{T}{n} = \text{const}$ .

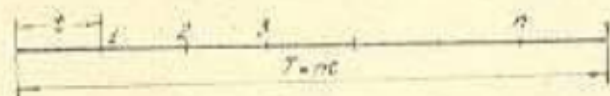


Рис. 32. Схема периодичности ремонтов

3. Каждый последующий ремонт за счет увеличения количества заменяемых запасных частей обходится дороже предыдущего на  $K$  рублей.

Из табл. 9 видно, что стоимость ремонта растет пропорционально числу ремонтов.

Таблица 9

Номер ремонта	Стоимость ремонта				
	1	2	3	$n-1$	$n$
1	$K$				
2		$2K$			
3			$3K$		
$n-1$				$(n-1)K$	
$n$					$nK$

Суммарная стоимость ремонтов за весь срок эксплуатации определится по выражению (72):

$$C_{\Sigma} = k(1+2+3+\dots+n). \quad (72)$$

Выражение в скобках представляет собой арифметическую прогрессию со знаменателем, равным единице. Сумма  $n$  членов арифметической прогрессии

$$S_n = \frac{n}{2} (a_1 + a_n) = \frac{n}{2} (1 + n),$$

где  $a_1$  и  $a_n$  — первый и последний члены прогрессии. Тогда

$$C_{\Sigma} = \frac{kn}{2} (1 + n).$$

Полная стоимость машины

$$C = A + C_r = A + \frac{kn}{2} (1 + n), \quad (73)$$

где  $A$  — цена новой машины. Удельная стоимость ремонта

$$C_{уд} = \frac{C}{n} = \frac{A}{n} + \frac{K}{2} (1 + n), \quad \frac{\text{руб.}}{\text{ремонт}}. \quad (74)$$

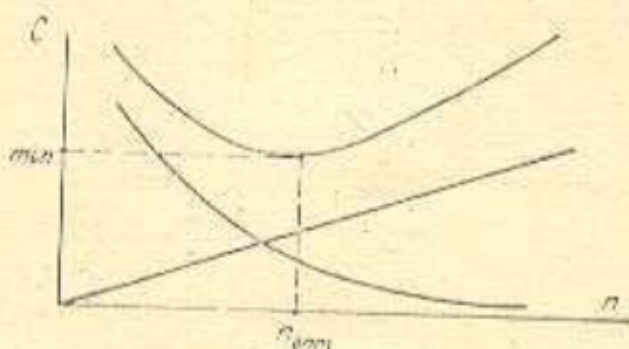


Рис. 33. Схема к расчету оптимальной (по стоимости запасных частей) долговечности машины

Величина  $C_{уд}$  и ее составляющие показаны на рис. 33. Видно, что с ростом наработки (количества ремонтов  $n$ ) амортизационные отчисления  $A/n$  падают, а стоимость ремонта линейно растет. Поэтому оптимальной долговечности  $n_{опт}$  соответствует минимальная удельная стоимость ремонта. Для нахождения  $n_{опт}$  надо найти первую

производную по  $n$  выражения (74) и приравнять ее нулю:

$$\frac{dC_{уд}}{dn} = -\frac{A}{n^2} + \frac{K}{2} = 0,$$

откуда

$$n_{опт} = \sqrt{\frac{2A}{K}} = \sqrt{\frac{2}{\frac{K}{A}}} = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}}, \quad (75)$$

где  $\varepsilon$  — относительное увеличение стоимости ремонта за счет увеличения количества заменяемых деталей.

Из рис. 34 видно, например, что при  $\varepsilon = 0,15$   $n_{опт} = 3,7 \approx 4$ . Это означает, что если стоимость заменяемых деталей возрастает,

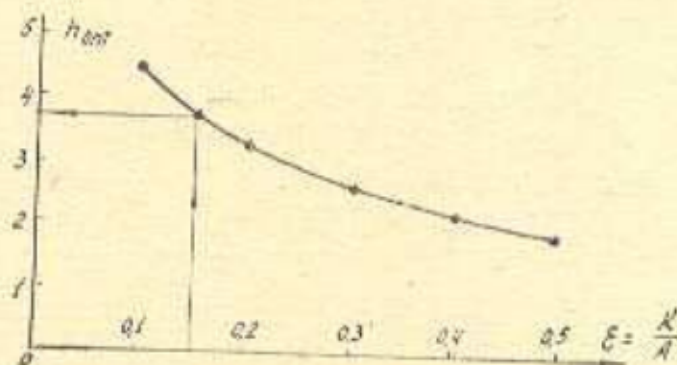


Рис. 34. Влияние стоимости ремонта на оптимальную долговечность.

тает за каждый ремонт на 15%, то после четвертого ремонта эксплуатация машины становится экономически невыгодной из-за больших затрат на ремонт.

#### 14. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Конструктивные и технологические мероприятия по повышению надежности и долговечности обычно связаны с дополнительными затратами на более прочные и износостойкие материалы, совершенствование технологического процесса и т. п. Поэтому до внедрения мероприятия необходимо сопоставить затраты с экономическим эффектом от повышения долговечности.

Сравним два варианта изготовления детали (табл. 10).

Таблица 10

Вариант	Себестоимость	Долговечность	Количество изделий
Исходный	$S_0$	$T_0$	$n_0$
Предлагаемый	$S > S_0$	$T > T_0$	$n < n_0$

При исходном варианте себестоимость изготовления, долговечность и количество потребных в эксплуатации деталей равны соответственно  $S_0$ ,  $T_0$ ,  $n_0$ . За счет дополнительных затрат на мероприятие себестоимость  $S$  и долговечность  $T$  возрастут, а потребное количество деталей  $n$  уменьшится. Обозначим:

$K_c = \frac{S}{S_0} > 1$  — коэффициент удорожания детали;

$K_d = \frac{T}{T_0} = \frac{n_0}{n} > 1$  — коэффициент повышения долговечности.

Экономия от внедрения мероприятия по повышению долговечности

$$\Delta S = S_0 n_0 - S n. \quad (76)$$

Выразив в формуле (76) величины  $S$  и  $n$  через  $S_0$  и  $n_0$ , получим:  $\Delta S = S_0 n_0 - K_c S_0 \frac{n_0}{K_d} = S_0 n_0 \left(1 - \frac{K_c}{K_d}\right)$ .

Тогда относительный экономический эффект от мероприятия

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S_0 n_0} = 1 - \frac{K_c}{K_d}. \quad (77)$$

Из формулы (77) видно, что  $\varepsilon > 0$  при  $K_d > K_c$ . Это означает, что мероприятие эффективно в том случае, если коэффициент увеличения долговечности будет больше, чем коэффициент удорожания себестоимости изготовления детали.

Рассмотрим пример.  $K_c = 1,25$ ;  $K_d = 1,5$ . Тогда  $\varepsilon = 0,17$ . Следовательно, несмотря на увеличение себестоимости детали на 25%, рост ее долговечности на 50% дает увеличение экономической эффективности на 17%.

## 15. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ

Режимы и методы обработки детали существенно влияют на ее надежность. Так, режимы обработки определяют шероховатость поверхности, наклеп и остаточные напряжения в поверхностном слое. В свою очередь, качество поверхностного слоя влияет на эксплуатационные характеристики деталей: износостойкость, контактную жесткость, усталостную прочность, коррозионную стойкость.

В табл. 11 приведено распределение причин отказов изделий машино- и приборостроения.

Таблица 11

№ п/п.	Причины отказов	Количество отказов, %
1.	Конструктивные	40
2.	Производственно-технологические	30
3.	Эксплуатационные	20
4.	Прочие	10

До 40% отказов связано с конструктивными дефектами — неправильным выбором схемы, нагрузок, запасов прочности, материалов, условий эксплуатации и т. п. Но даже грамотно спроектированная машина может отказать из-за производственно-технологических дефектов, число которых достигает 30%. Поэтому повышение технологической составляющей надежности является важнейшим резервом производства.

Задача производства — выпускать качественную продукцию.

Понятие качество продукции включает в себя две составляющие:

1. Производственное качество — степень соответствия изделия требованиям технической документации (изготовить деталь,

узел, машину по чертежу). Это заводское (статическое) качество в момент сдачи продукции.

2. Эксплуатационное качество — степень соответствия выходных параметров машины (точность, производительность, мощность и т. п.) требованиям технической документации — определяется скоростью их изменения во времени. Эта составляющая качества, зависящая от скорости расходования запасов по выходным параметрам, может быть названа динамическим качеством.

Надежность производства зависит от оборудования, технологического процесса и системы контроля.

1. Технологическая надежность станка — это его способность сохранять качественные показатели технологического процесса (точность обработки и качество поверхности) в течение заданного периода эксплуатации [8].

Количественно технологическая надежность определяется как вероятность безотказной работы станка в течение заданного времени в заданном режиме.

Отказом технологического оборудования является событие, заключающееся в нарушении работоспособности. Внезапный отказ связан с поломкой оборудования, т. е. с прекращением работы станка. Постепенный отказ обычно является отказом точности, т. е. нарушением технических условий на размеры детали, шероховатость поверхности и т. п. Для определения технологической надежности периодически через определенное время (500...1000 часов) рассчитываются показатели точности обработки партии деталей (среднеарифметическое  $a$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ ). Если параметр точности  $X$  распределен по нормальному закону, то вероятность того, что он находится в пределах допуска (т. е. технологическая надежность станка), определится по формуле:

$$P(x) = \text{Вер}(X_{\min} < X < X_{\max}) = \\ = \Phi\left(\frac{X_{\max} - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{X_{\min} - a}{\sigma}\right) = \Phi(z_1) - \Phi(z_2), \quad (78)$$

где  $\Phi(z)$  — нормированная функция Лапласа. Величина  $P(x)$  с течением времени уменьшается за счет смещения центра группирования (износ инструмента, погрешность настройки) и увеличения мгновенного рассеивания размеров (величина  $\sigma$  обычно возрастает за счет износа сопряжений станка, уменьшения статической и динамической жесткости станка).

2. Надежность операции — вероятность выпуска годной продукции на данной операции:

$$P_{оп} = \frac{N-n}{N} = 1 - \frac{n}{N}, \quad (79)$$

где  $N$  — количество обработанных на данной операции деталей;  
 $n$  — количество бракованных (отказавших по точности  
или другим параметрам деталей).

Надежность операции практически совпадает с традицион-  
ным понятием «выход годной продукции». Недостатком поня-  
тия «надежность операций» является то, что в нем не учтено,  
за какое время оценивается надежность.

### 3. Параметр потока отказов операций $\omega_{оп}$ .

Под величиной  $\omega_{оп}$  понимается относительное количество  
отказов в единицу времени:

$$\omega_{оп} = \frac{n}{Nt_{ц}}, \quad (80)$$

где  $t_{ц}$  — время цикла обработки. Поскольку  $Q_{оп} = n/N$  — доля  
брака на данной операции, то

$$\omega_{оп} = Q_{оп}/t_{ц}. \quad (81)$$

Таким образом, величина  $\omega_{оп}$  представляет собой вероятность  
отказа за один цикл обработки. Величина

$$T_{оп} = \frac{1}{\omega_{оп}} \quad (82)$$

характеризует среднее время безотказной работы на данной  
операции. Например,  $Q_{оп} = 1\% = 0,01$ ;  $t_{ц} = 1$  мин, тогда  $\omega_{оп} =$   
 $= 10^{-2}$ , 1/мин,  $T_{оп} = 100$  мин.

4. Надежность технологического процесса  $\omega_{тп}$  — это его спо-  
собность протекать без вынужденных внеплановых перерывов  
в течение заданного времени в заданных условиях, сохраняя  
при этом показатели качества в заданных пределах. Так как  
технологический процесс представляет собой последователь-  
ность отдельных операций (последовательное соединение), то  
при независимых отказах на каждой операции

$$\omega_{тп} = \sum_{i=1}^m \omega_{оп i}$$

где  $m$  — количество операций технологического процесса. То-  
гда среднее время безотказной работы

$$T_{тп} = \frac{1}{\omega_{тп}}. \quad (84)$$

Если известны надежности отдельных операций  $P_{опi}$ , то надеж-  
ность технологического процесса, т. е. вероятность выпуска  
годной продукции,

$$P_{гн} = \prod_{i=1}^m P_{оп i} \quad (85)$$

### 5. Надежность контроля:

Качественно надежность контроля определяется как способность системы контроля давать объективную оценку качеству продукции. Количественно надежность контроля представляет собой вероятность того, что используемые методы и средства контроля дадут правильную оценку годности или негодности продукции.

Любой метод контроля характеризуется погрешностью

$$\Delta = y - x,$$

где  $x$  — истинное (неизвестное нам) значение контролируемой величины;

$y$  — измеренное значение.

Величины  $x$  и  $y$  являются случайными, подчиняющимися определенным законам распределения. При контроле величины  $X$  возможны следующие выводы о качестве продукции (рис. 35):

1. Несмотря на погрешность измерения  $\Delta$ , годная деталь признана при контроле годной (рис. 35, а). Вероятность этого события

$$P_{xy} = \frac{N_{гг}}{N_0} = P_{гг} \quad (86)$$

где  $N_{гг}$  — количество годных деталей среди принятых;

$N_0$  — общее количество проверенных деталей.

Примечание. В выражении (86) и далее первый индекс соответствует истинному размеру детали, второй — результату контроля.

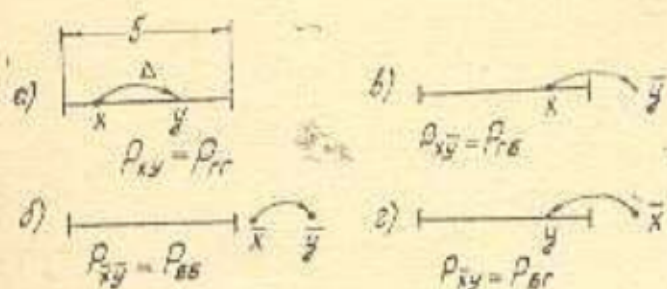


Рис. 35. Схема к расчету надежности контроля



Рис. 36. Схема к расчету надежности производства

2. Негодная деталь признана при контроле негодной (рис. 35, б). Вероятность этого события



$$P_{\bar{x}y} = \frac{N_{\text{ББ}}}{N_0} = P_{\text{ББ}}, \quad (87)$$

где  $N_{\text{ББ}}$  — количество правильно забракованных деталей.

3. Годная деталь ошибочно забракована (ложный брак) (рис. 35 в). Вероятность этого события

$$P_{\bar{x}y} = \frac{N_{\text{ГБ}}}{N_0} = P_{\text{ГБ}}, \quad (88)$$

где  $N_{\text{ГБ}}$  — количество годных, но ошибочно забракованных деталей.

4. Негодная деталь ошибочно принята годной (скрытый брак) (рис. 35 г). Вероятность этого события

$$P_{x\bar{y}} = \frac{N_{\text{БГ}}}{N_0} = P_{\text{БГ}}, \quad (89)$$

где  $N_{\text{БГ}}$  — количество бракованных, но ошибочно принятых деталей.

Сумма вероятностей четырех исходов образует полную группу событий, поэтому

$$P_{\text{ГГ}} + P_{\text{ББ}} + P_{\text{ГБ}} + P_{\text{БГ}} = 1.$$

Тогда надежность контроля  $P_k$  и ненадежность контроля  $Q_k$

$$\left. \begin{aligned} P_k &= P_{\text{ГГ}} + P_{\text{ББ}} \\ Q_k &= P_{\text{ГБ}} + P_{\text{БГ}} \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

6. Надежность производства  $P_{\text{пр}}$  — это вероятность того, что принятая деталь окажется годной. Общее количество обработанных деталей состоит из деталей четырех групп:

$$N_0 = N_{\text{ГГ}} + N_{\text{ББ}} + N_{\text{ГБ}} + N_{\text{БГ}}.$$

Однако после контроля все детали будут разделены только на две группы — принятые и забракованные (рис. 36). При этом в числе принятых будет скрытый брак  $N_{\text{БГ}}$ , а среди забракованных — ложный  $N_{\text{ГБ}}$ . Под надежностью производства понимается доля годных деталей в принятых:

$$P_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{ГГ}}}{N_{\text{ГГ}} + N_{\text{БГ}}} = \frac{N_{\text{ГГ}}/N_0}{(N_{\text{ГГ}} + N_{\text{БГ}})/N_0} = \frac{P_{\text{ГГ}}}{P_{\text{ГГ}} + P_{\text{БГ}}}. \quad (91)$$

Величина  $P_{\text{пр}}$  определяется повторным контролем деталей. В машиностроении  $P_{\text{пр}} = 0,8 \dots 0,95$ .

## 16. СРАВНЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО И МЕЖОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

На рис. 37 показаны схемы двух одинаковых технологических процессов, отличающихся только методом контроля (места контроля отмечены крестиком). Оценим эффективность этих методов при следующих условиях:

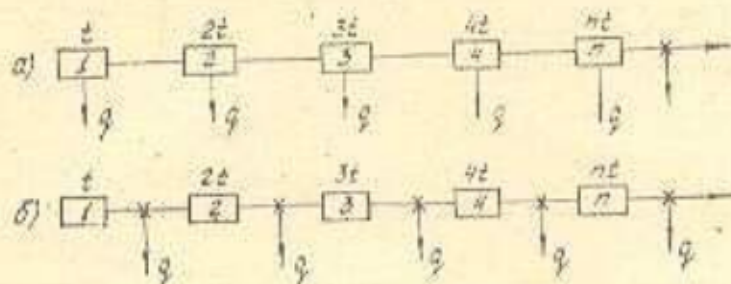


Рис. 37. Схема к расчету эффективности окончательного и межоперационного контроля.

1. Пенадежность каждой из  $n$  операций в обоих вариантах одинакова и равна  $q$ .
2. Надежность окончательного и межоперационного контроля равна единице.
3. Трудоемкость каждой операции  $t$  одинакова.
4. Количество поступающих на обработку деталей  $N$  одинаково.

### I. Окончательный контроль (рис. 37 а)

Так как брак с вероятностью  $q$  возникает на каждой операции, то количество бракованных деталей на каждой операции составит  $Nq$ , а общее количество бракованных деталей на всех  $n$  операциях

$$N_B = nNq.$$

Брак обнаруживается только при окончательном контроле. К этому моменту на каждую деталь будет затрачена трудоемкость  $nt$ . Поэтому потерянная для производства за счет брака общая трудоемкость

$$T_{ок} = N_B nt = n^2 \cdot N \cdot tq. \quad (92)$$

### II. Межоперационный контроль (рис. 37 б)

Считаем, как и в первом варианте, что на каждой операции образуется одинаковое количество бракованных деталей  $Nq$ , но

поскольку при межоперационном контроле брак обнаруживается после каждой операции, то в дальнейшем на бракованную деталь трудоемкость не расходуется. В этом случае суммарная потерянная трудоемкость

$$T_{\text{меж}} = Ntq(1 + 2 + 3 + \dots + n). \quad (93)$$

Выражение в скобках представляет собой арифметическую прогрессию со знаменателем, равным единице. Сумма  $n$  членов прогрессии

$$S = \frac{(a_1 + a_n)}{2} \cdot n = \frac{(1 + n)}{2} \cdot n,$$

где  $a_1$  и  $a_n$  — первый и  $n$ -й члены прогрессии.

Тогда

$$T_{\text{меж}} = \frac{Nntq(1 + n)}{2}. \quad (94)$$

Отношение потерянных трудоемкостей при двух вариантах контроля

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{ок}}}{T_{\text{меж}}} = \frac{2Nn^2iq}{Nntq(n + 1)} = \frac{2n}{n + 1}. \quad (95)$$

Величина  $\varepsilon$  характеризует относительное увеличение потерянной трудоемкости при варианте окончательного контроля. При  $n \rightarrow \infty$   $\varepsilon \rightarrow 2$ .

Рассмотрим пример:  $n = 10$ , тогда  $\varepsilon = 1,82$ . Это означает, что при равной надежности технологического процесса потерянная трудоемкость при окончательном контроле на 82% выше, чем при межоперационном.

## 17. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Надежность является важнейшей характеристикой изделия. Все выходные параметры изделия (мощность, производительность, экономичность и др.) имеют значение только при условии обеспечения надежности. Требуемые показатели надежности должны закладываться на этапе проектирования. Для этого конструктор и технолог обязательно должны иметь обратную связь с потребителем. На базе эксплуатационной статистики об отказах можно определить факторы, наиболее влияющие на надежность, разработать мероприятия по ее повышению, оценить количественно показатели надежности.

Важнейшим условием обеспечения надежности является глубокое понимание процессов, происходящих в изделии, не менее важно изучение физики отказов. Именно на этой основе могут быть предложены мероприятия по устранению причин внезап-

ных отказов и прогнозированию постепенных отказов путем контроля скорости изменения во времени выходных параметров изделия. Поэтому знание основных положений теории надежности является важным условием качественной подготовки современного инженера.

### Литература

1. Волчков Л. И. Надежность автоматических линий. М., «Машиностроение», 1969.
2. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М., «Высшая школа», 1972.
3. ГОСТ 13377—75. Надежность в технике. Термины и определения.
4. ГОСТ 15467—70. Качество продукции. Термины.
5. Елизаветин М. А. Повышение надежности машин. М., «Машиностроение», 1968.
6. Елизаветин М. А., Сателъ Э. А. Технологические способы повышения долговечности машин. М., «Машиностроение», 1969.
7. Коллегаев Р. Н. Определение оптимальной долговечности технических систем. М., «Советское радио», 1967.
8. Проников А. С. Технологическая надежность станков. М., «Машиностроение», 1971.
9. Ремонтпригодность машин. Под ред. Волкова П. Н. М., «Машиностроение», 1975.
10. Сорин Я. М. Физическая сущность надежности. М., Издательство стандартов, 1969.
11. Степанов С. В. Профилактические работы и сроки их проведения. М., «Советское радио», 1972.
12. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М., «Высшая школа», 1970.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
1. Введение	3
2. Причины обострения проблемы надежности в машиностроении	—
3. Основные сведения из теории вероятностей	5
4. Вероятностный смысл надежности	8
5. Классификация процессов изменения качества машины по скорости их протекания	9
6. Изменение показателей качества машины с течением времени	11
7. Основные понятия и определения	12
8. Показатели надежности	22
9. Надежность при внезапных отказах	31
10. Надежность при постепенных отказах	38
11. Надежность системы	41
12. Связь надежности с запасом прочности	44
13. Определение оптимальной долговечности машины	47
14. Экономическая эффективность повышения долговечности	51
15. Технологическая надежность	52
16. Сравнение экономической эффективности окончательного и межоперационного контроля	57
17. Заключение	58
Литература	59

Владимир Андреевич Бульчев

### ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Ответственный редактор П. В. Гражданкин

Редактор Е. С. Поздеева

Технический редактор П. С. Полторац

Корректор О. В. Крашенинникова

Сдано в набор 6/VI 1978 г. Подписано в печать 29/XI 1978 г. ЕО01522.  
 Формат 60×84<sup>1/8</sup>. Бумага обертка белая. Усл. печ. л. 3,48. Уч.-изд. л. 3,5.  
 Печать высокая. Гарнитура литературная. Тираж 500 экз.  
 Цена 14 коп.

Обл. тип. им. Маяки, г. Куйбышев. Заказ № 4759.