Системный подход при проектировании, техническая эксплуатация и обслуживание электронных средств и автоматизированных систем

# лекция 2

# Билет 4
# Безотказность

# Вероятность безотказной работы

**Случайной** подразумевается величина, принимающая в результате опыта значение, которое предугадать невозможно.
Так как отказ – случайная величина, то и время появления отказа (время функционирования РЭС) $t_ф$ – также случайная величина.

Все случайные величины делятся на **непрерывные** и **дискретные**.
Например, непрерывные - время безотказной работы,
дискретные – число отказов, число неисправных устройств и т.д.

Мерой безотказности является **вероятность безотказной работы** *P(t).*
*P(t)* - вероятность того, что время функционирования РЭС - $t_0$ будет больше некоторого заданного времени наработки t :

$P(t) = P(t_ф > t)$

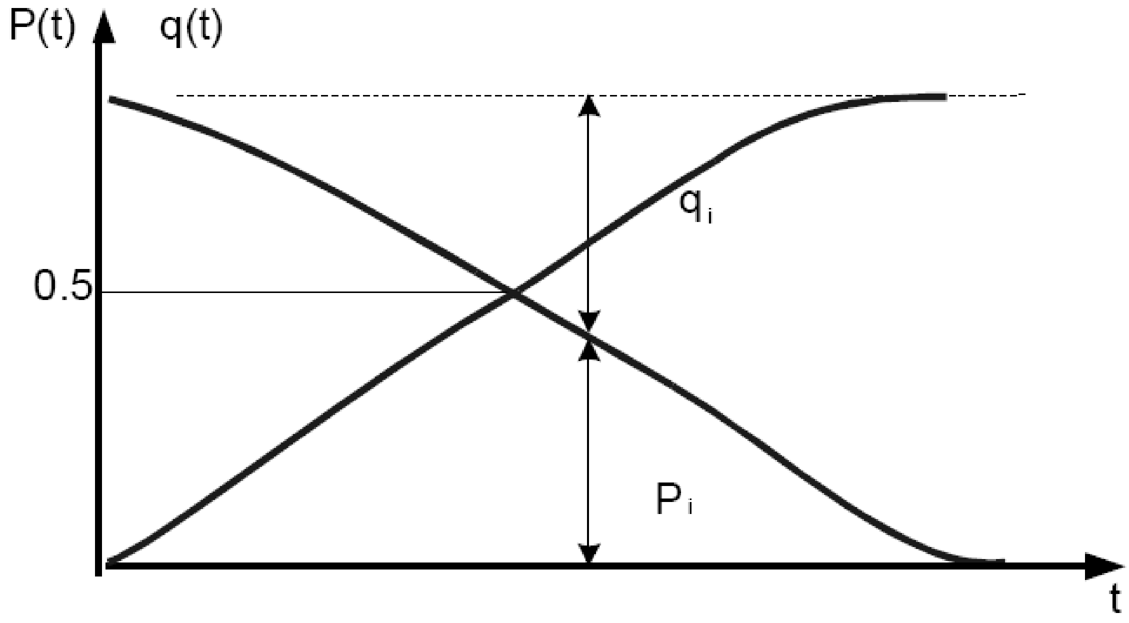
Полагая, что в момент включения РЭС работоспособно: *p(0)*=1, можно заметить, что *P(t)* есть монотонно убывающая функция, причём *P(∞)*=0 (в любой аппаратуре когда-нибудь произойдёт отказ).

$P(0) = 1, P(\infty) = 0.$ $1>P(t_p)>0.$

# Надёжность - вероятность отказа

Надежность изделия удобнее характеризовать вероятностью отказа

$$q(t) = 1 - P(t) = P(t > t_0) = P(t_0 < t)$$



# Алгебра вероятностей

Если вероятность события не меняется в зависимости от того, произошло другое событие или нет, то такие события называют **независимыми**. Иначе - события считаются **зависимыми**.

События бывают **несовместные**, если они не могут появиться вместе. События, у которых вероятность равна 1, называются **достоверными**.

**Вероятность суммы** n несовместных событий (когда происходит любое из n событий) равна сумме n вероятностей этих событий:

$$P(A) = \sum_{i=1}^{n} P(A_i);$$

Для системы, состоящей из ряда последовательно соединенных элементов, вероятность безотказной работы может быть представлена в виде **произведения вероятностей** безотказной работы всех элементов:

$$P_c(t) = P_1(t)\, P_2(t) \ldots P_N(t) = \prod_{i=1}^{N} P_i(t).$$

**Теорема полной вероятности**: где Hi - несовместные гипотезы.

$$P(A) = \sum_{i=1}^{n} P(H_i) \cdot P(A / H_i)$$

Пример 2.1._На складе *100* приборов, из них *50* - исправные, *30* - не имеют отказов и *20* – отказавших. Найти вероятность того, что взятый наугад прибор будет работоспособен.

Пример 2.1. На складе *100* приборов, из них *50* - исправные, *30* - не имеют отказов и *20* – отказавших. Найти вероятность того, что взятый наугад прибор будет работоспособен.

Если принять: $A$ – выбор работоспособного прибора, $A_1$ – исправного и $A_2$ – безотказных, то

$$P(A)=P(A_2)+P(A_1)=0,5+0,3=0,8.$$

Пример 2.2. Каждое выпускаемое на заводе изделие может иметь дефект (вероятность дефекта $P_Д=0,95$). Оно осматривается двумя контролерами, из которых первый обнаруживает дефект с вероятностью $P_1=0,8$, а второй — $P_2=0,9$. Найти вероятность того, что изделие будет забраковано.

Пример 2.2. Каждое выпускаемое на заводе изделие может иметь дефект (вероятность дефекта $P_Д$=*0,95*). Оно осматривается двумя контролерами, из которых первый обнаруживает дефект с вероятностью $P_1$=*0,8*, а второй — $P_2$=*0,9*. Найти вероятность того, что изделие будет забраковано.

Если принять: $A$ – дефект обнаружен, $A_1$ – первым и $A_2$ – вторым контролером, то

$$A = A_1 A_2 + A_1 \overline{A}_2 + \overline{A}_1 A_2 ,$$

где $\overline{A}_1, \overline{A}_2$ - не обнаружение дефекта первым  и вторым контролерами.

Тогда на основании теоремы полной вероятности получим

$$P(A) = P_Д[(A_1 \cdot A_2) + P(A_1 \cdot \bar{A}_2) + P(\overline{A_1} + A_2)] =$$
$$= 0{,}95[0{,}8 \cdot 0{,}9 + 0{,}8 \cdot 0{,}1 + 0{,}2 \cdot 0{,}9] = 0{,}931.$$

# Статистика безотказной работы

Pi

Вероятность *P(t)* показывает, какая часть из группы одинаковых изделий будет работать **исправно** в течение заданного интервала времени t, поэтому практически величина P(t) определяется статистическим путем по информации об отказах за выбранный промежуток времени $t_i$ :

$$\boxed{\overline{Pi} = \frac{(N - ni)}{N}}$$

где $N$ – число изделий в начале испытаний;
$n_i$ – число изделий, отказавших за время $t_i$.

При числе изделий $N \geq 20$ статистическая вероятность $P_i$ сходится к вероятности $P(t)$.

$$P(t) = P(t_ф > t)$$

Пояснение:
Предположим, что работают, *a* изделий одного типа.
В течение времени $t_р$ за ними ведется наблюдение и к концу интервала установлено, что *b* изделий работают исправно, а *(a–b)* вышли из строя.
Тогда вероятность безотказной работы можно оценить следующим образом:

$$P(t_р) = b/a$$

# Статистическая интенсивность отказов

λi

Критерием, наиболее полно характеризующим надежность неремонтируемых объектов, является интенсивность отказов

Интенсивность отказов показывает, какая доля всех изделий или элементов данного типа в среднем выходит из строя за 1 час работы.

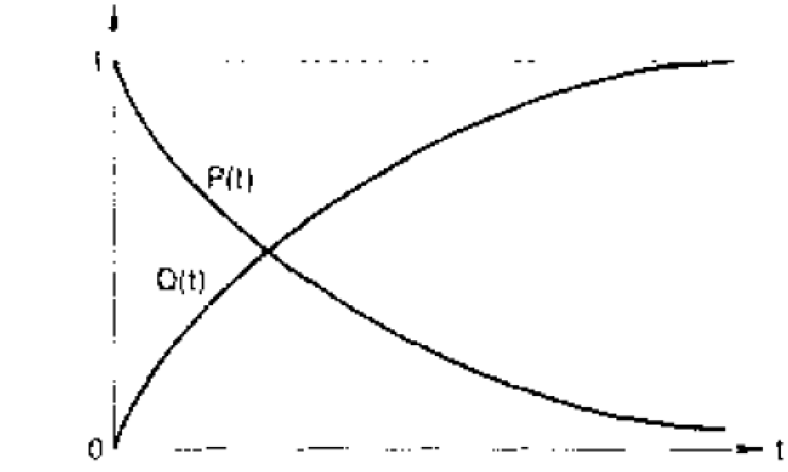
Из опытных данных она рассчитывается по формуле:

$$\boxed{\lambda = \Delta n_i / (N_{CP} \Delta t_i),}$$

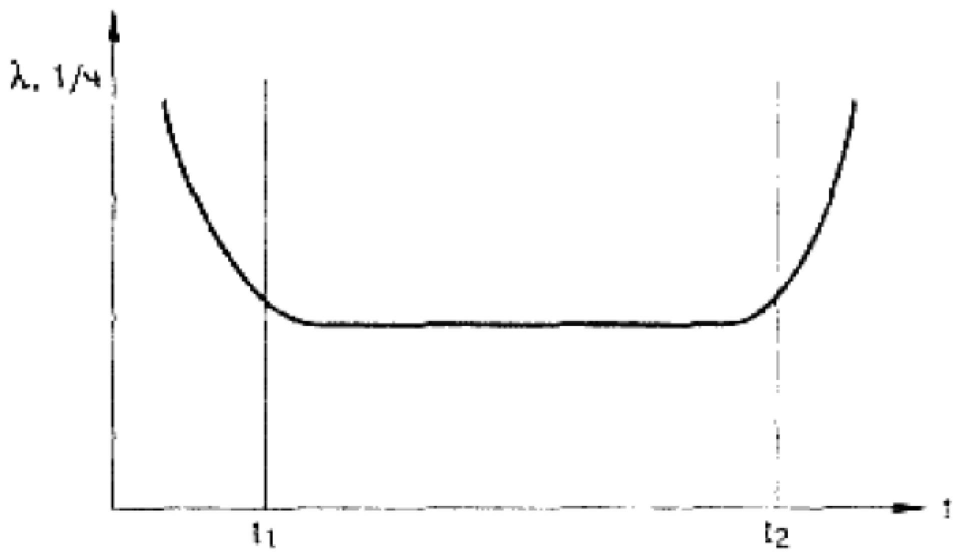
где $\Delta n_i$ – число отказов за промежуток времени $\Delta t_i$; $N_{cp}=(N_i+N_{i+1})/2$ – среднее число работоспособных элементов; $N_i$ – число элементов, работоспособных в начале рассматриваемого промежутка времени; $N_{i+1}$ – число элементов, работоспособных в конце промежутка времени $\Delta t_i$ .

**При определении надёжности аппаратуры** имеют в виду то значение интенсивности отказов λ, которое имеет место в период нормальной работы.

# Времена работы РЭС




a




*I* – приработка; *II* – нормальная эксплуатация; *III* – старение

Время от начала работы до момента $t_1$ называют **периодом приработки**.

В течение этого времени из строя выходят элементы, имеющие грубые внутренние дефекты, оставшиеся незамеченными при выходном контроле.

Время, когда происходят отдельные случайные отказы, называют **периодом нормальной работы**.

Время после момента $t_2$ , когда отказы непрерывно растут, называют **старением**.

# Экспоненциальная интенсивность

Для большинства радиоэлектронных устройств вероятность безотказной работы может быть определена по формуле $P(t_p) = e^{-\lambda t}$,
где $\lambda$ – интенсивность отказов.

Например, если $\lambda=10^{-5}$, то это означает, что за 1 час работы из строя выйдет одна стотысячная доля элементов, соответственно за 1000 часов работы можно ожидать выхода из строя одной сотой доли всех элементов данного типа. Если в устройстве имеется 100 таких элементов, то в среднем за каждые 1000 часов из строя выходит один элемент.

Интенсивность отказов радиоэлектронной аппаратуры, состоящей из n различных элементов, определяют по формуле (потому что $\lambda$ - степени):

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$$

# Ориентировочные значения интенсивности отказов для некоторых групп радиоэлементов

| Электрорадиоэлементы | $\lambda_0 * 10^{-6}$, 1/ч |
|---|---|
| Микросхемы: | |
| цифровые биполярные и запоминающие устройства на цилиндрических магнитных доменах | 0,1 |
| цифровые МОП | 0,3 |
| аналоговые | 0,8 |
| Оптоэлектронные полупроводниковые приборы: | |
| диоды, излучающие лучи инфракрасного диапазона, фотодиоды | 0,1 |
| диоды, излучающие лучи видимого диапазона | 0,3 |
| оптопары транзисторные | 0,5 |
| оптопары диодные | 0,2 |
| оптопары тиристорные и резисторные | 1,0 |
| Резисторы: | |
| постоянные непроволочные пленочные | 0,008 |
| постоянные непроволочные объемные | 0,005 |

Эти значения получены для случая, когда коэффициент нагрузки К=1 и температура *t=20 °C,* их будем обозначать $\lambda_o$.

# Коэффициент нагрузки

Влияние внешних факторов на надежность радиоэлементов можно оценить с помощью **коэффициента нагрузки** *К* - отношение действительного значения воздействующего фактора к номинальному или максимально допустимому.

Например:

– *для транзисторов:* $K = \dfrac{P_K}{P_{K\max}}$,

где $P_к$ – фактическая мощность, рассеиваемая на коллекторе; $P_{к\ \max}$ – максимально допустимая мощность рассеивания на коллекторе;

– *для выпрямительных диодов:* $K = \dfrac{I}{I_{\max}}$,

где I – фактический выпрямленный ток; $I_{\max}$ – максимально допустимый выпрямленный ток;

– *для резисторов:* $K = \dfrac{P}{P_Н}$,

где *P* – фактическая мощность, рассеиваемая на ЭРЭ; $P_н$ – номинальная мощность;

# Коэффициент влияния

Влияние на надежность фактического значения коэффициента нагрузки и температуры учитывают при помощи коэффициента влияния, а $\lambda = a\,\lambda_0$.

Значения коэффициента влияния (a)

| t °C | Значение а при *K*, равном | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,0 |
| Постоянные пленочные углеродистые резисторы | | | | | |
| 20 | 0,24 | 0,30 | 0,43 | 0,73 | 1,0 |
| 40 | 0,27 | 0,35 | 0,50 | 0,86 | |
| 60 | 0,34 | 0,45 | 0,64 | 1,2 | |
| Постоянные проволочные резисторы | | | | | |
| 20 | 0,13 | 0,20 | 0,30 | 0,60 | 1,0 |
| 40 | 0,15 | 0,22 | 0,35 | 0,75 | 1,27 |
| 60 | 0,17 | 0,27 | 0,45 | 1,04 | |
| Непроволочные керметные и металлоокисные резисторы | | | | | |
| 20 | 0,59 | 0,62 | 0,67 | 0,82 | 1,0 |
| 40 | 0,63 | 0,65 | 0,72 | 0,90 | |
| 60 | 0,70 | 0,74 | 0,82 | 1,06 | |
| Переменные непроволочные композиционные пленочные резисторы | | | | | |
| 20 | 0,15 | 0,24 | 0,36 | 0,66 | 1,0 |
| 40 | 0,20 | 0,32 | 0,50 | 0,94 | |

# Средняя наработка до отказа



Величина интенсивности отказов также связана с другой характеристикой надежности **- средней наработкой до отказа** $T_{ср}$:

$$\overline{T}_{CP} = \sum_{i=1}^{N} t_i / N,$$

Допустим, какое-то количество РЭС одного и того же типа эксплуатируется заданное время.
При этом регистрируется суммарное количество часов $t_э$,
которое проработали все изделия, и количество возникших отказов $N$.
В этом случае средняя наработка до отказа:

$$T_{ср} \approx t_э / N$$

Естественно, что точность оценки средней наработки до отказа улучшается при увеличении количества проверяемых изделий.
Чем больше $T_{ср}$, тем выше надежность РЭС.

# Частота отказов

fi

Под **частотой отказов** элементов понимают число отказов в единицу времени, отнесенное к первоначальному числу поставленных на испытание элементов.

$$\overline{f_i} = \frac{\Delta n_i}{N \cdot \Delta t_i}$$

где $n_i$ – число отказов в интервале времени $\Delta t_i$;
$N$ – число испытуемых изделий;
$\Delta t_i$ – время испытаний.

Функция частоты *f(t)* характеризует скорость снижения надежности во времени и является **плотностью распределения** времени безотказной работы РЭС.

# Интегральная частота отказов

f
P
Q

Переведём в непрерывные величины:

$$\overline{P}_i = \frac{(N - n_i)}{N} = 1 - \frac{n_i}{N} \;=>\; \frac{n_i}{N} = 1 - \overline{P}_i \;=>\; \frac{n_i}{N \cdot \Delta t_i} = (1 - \overline{P}_i)/\Delta t_i$$

$$=> f = \frac{dn}{N \cdot dt} = d(1 - P)/\mathrm{d}t = -dP/dt = dQ/dt$$

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t)\,dt$$

$$f = -dP/dt = dQ/dt$$

$$Q(t) = \int_0^{t} f(t)\,dt$$

# Интегральная средняя наработка

Т

$$\bar{T}_{CP} = \sum_{i=1}^{N} t_i / N,$$

В сущности $T_{ср}$ - это математическое ожидание времени работы до первого отказа.

$$M_X = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \; (0 \le x < \infty).$$

$$T_{CP} = \int_0^{\infty} tf(t)dt = -\int_{0\infty} tP^1(t)dt.$$

Интегрируя по частям, получим:

$$T_{CP} = -tP(t)\int_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t)\,dt.$$

$$tP(t)\int_0^{\infty} = 0$$

так как при верхнем пределе *P(t)* быстрее стремится к нулю, чем $\Delta t$ - к бесконечности, поэтому:

$$\boxed{T_{CP} = \int_0^{\infty} P(t)dt}$$

а для экспоненциальной интенсивности:

$$\boxed{\lambda = \frac{1}{T_{CP}}}$$

# Интегральная интенсивность

λ

Интенсивность отказов λ*(t)* связана с *f(t)* и *P(t).*

$$\lambda = \Delta n_i / (N_{CP} \Delta t_i), \ \text{ч}^{-1}$$

$$\overline{\lambda} i = \frac{\Delta n_i / N \Delta t_i}{N_{CP} \Delta t_i / N \Delta t_i} = \frac{\overline{f}_i}{(N - n_{cp}) / N} = \frac{\overline{f}_i}{\overline{\overline{P}}_i}.$$

Переходя от дискретных понятий к непрерывным:

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

# Вероятность работ в интервале

λ

$$f = -dP/dt \;=>\; \lambda(t) = -dP(t)/dtP(t),$$

$$\lambda(t)\,dt = -dP(t)/P(t).$$

$$\boxed{P(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(t)dt] + C.}$$

$t = 0$ и $P(0) = 1$, следовательно, $C = 0$.

На практике часто представляет интерес вероятность безотказной работы РЭА на интервале $(t_1,t_2)$. В этом случае говорят об условной вероятности безотказной работы в момент времени $t_2$, при условии, что в момент времени $t_1$ РЭС была работоспособна.

$$P(t_2,t_1) = \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2}\lambda(t)dt\right].$$

**Пример 2.2.** В результате наблюдения за $N = 45$ неремонтируемыми объектами РЭА получены данные до первого отказа всех 45 образцов (табл. 2.3.). Требуется определить вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа $\overline{T}_{ср}$.

Таблица 2.3

| $\Delta t_i$, ч | $\Delta n_i$ | $\Delta t_i$, ч | $\Delta n_i$ | $\Delta t_i$, ч | $\Delta n_i$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 - 5 | 1 | 30 - 35 | 4 | 60 - 65 | 3 |
| 5 - 10 | 5 | 35 - 40 | 3 | 65 - 70 | 3 |
| 10 - 15 | 8 | 40 - 45 | 0 | 70 - 75 | 3 |
| 15 - 20 | 2 | 45 - 50 | 1 | 75 - 80 | 1 |
| 20 - 25 | 5 | 50 - 55 | 0 | – | – |
| 25 - 30 | 6 | 55 - 60 | 0 | – | – |

Решение.

1. $\overline{P}(t) = (N - \Delta n_i)/N$; $\overline{\lambda}(t) = \Delta n_i / N_{CP}\Delta t$

Рассчитанные по этим формулам данные сведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

| $\Delta t_i$ ч | 0 - 5 | 5 - 10 | 10 - 15 | 15 - 20 | 20 - 25 | 25 - 30 | 30 - 35 | 35 - 40 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\overline{P}(t)$ | 0,98 | 0,87 | 0,69 | 0,64 | 0,53 | 0,4 | 0,31 | 0,25 |
| $\overline{\lambda}(t)\,10^{-3}$ ч | 4,5 | 2,41 | 45,7 | 13,3 | 37/7 | 57,1 | 50 | 48 |
| $\Delta t_i$ ч | 40 - 45 | 45 - 50 | 50 - 55 | 55 - 60 | 60-65 | 65-70 | 70-75 | 75 - 80 |
| $\overline{P}(t)$ | 0,25 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,16 | 0,09 | 0,02 | 0 |
| $\overline{\lambda}(t)\,10^{-3}$ ч | 0 | 19 | 0 | 0 | 70,8 | 109 | 240 | 1200 |

Графики $P(t)$ и $\lambda(t)$ приведены соответственно на рис. 2.7 и 2.8.

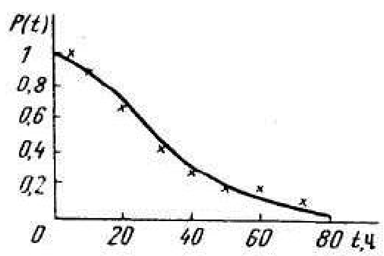



Рис. 2.7. Зависимость вероятности отказов от времени

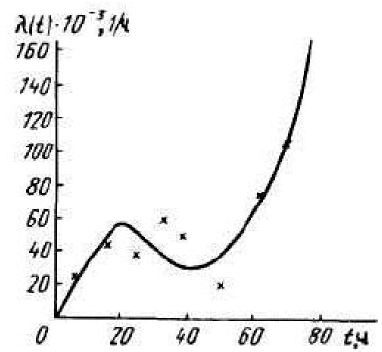



Рис. 2.8. Зависимость интенсивности безотказной работы от времени

2. Средняя наработка до первого отказа:

$$\overline{T}_{CP} = \left(\sum_{i=1}^{m} \Delta n_i t_{CPi}\right)/N = \frac{1\ \ 2,5 + 5\ \ 7,5 + 8\ \ 12,5 + \ldots + 1\ \ 77,5}{45} = 31,7\ ч.$$

**Пример 2.1.** Испытывается $N$ = 500 изделий. За время $t$ = 2000 ч отказало $n$ = 200 изделий. За последующие $\Delta t_i$ =100 ч отказало еще $\Delta n_i$ = 100 изделий. Определить $\overline{P}$ (2000), $\overline{P}$ (2100), $\overline{f}$ (2050) и $\overline{\lambda}$ (2050).

**Пример 2.1.** Испытывается $N$ = 500 изделий. За время $t$ = 2000 ч отказало $n$ = 200 изделий. За последующие $\Delta t_i$ =100 ч отказало еще $\Delta n_i$ = 100 изделий. Определить $\overline{P}$ (2000), $\overline{P}$ (2100), $\overline{f}$ (2050) и $\overline{\lambda}$ (2050).

**Решение.**

1. $\overline{P} = \dfrac{N - n(2000)}{N} = \dfrac{500 \quad 200}{500} = 0,6;$ $\overline{P}\ (2100) = \dfrac{500 \quad 300}{500} = 0$

2. $\overline{f}\ (2050) = \dfrac{\Delta n_i}{N \Delta t_i} = \dfrac{100}{500\,100} = 2\,10^{-3}\ ч^{-1},$

$$\overline{\lambda}\ (2050) = \frac{\Delta n_i}{N_{CP} \Delta t_i} = \frac{100}{(300+200)/2\,100} = 4\ ^{10-3}\ ч^{-1}.$$

3. Интенсивность отказа можно определить и по формуле (2.9):

$$\overline{\lambda}\ (2050) = \overline{f}_i / \overline{P}_i; \qquad \overline{P}\ (2050) = \frac{500 - 250}{500} = 0,5.$$

Тогда
$$\overline{\lambda}\ (2050) = \frac{2\,10^{-3}}{0,5} = 4 \quad 10^{-3}\ ч^{-1}.$$

# Билет 5
# Теория массового обслуживания

# Массовое обслуживание

**Массовым обслуживанием** (МО) называется система, состоящая из определённого числа обслуживающих единиц, называемых **каналами обслуживания**.
Такие системы могут быть одноканальными и многоканальными.

Основные характеристики системы МО:
– поток событий-отказов;
– число каналов обслуживания;
– быстродействие каждого канала.

Поток событий называется **простейшим**, если он обладает свойствами:
1) **ординарности** (вероятность одновременного появления 2-х событий практически невозможна)
2) **стационарности** (вероятность попадания того или иного события на участок времени от момента t до t + d*t* не зависит от t, а зависит только от длины участка dt)
3) **отсутствием последействия** (для двух отрезков времени число событий, попадающих в один из них, не зависит от числа событий, попадающих в другой).

# Заявка на ремонт

Одной из важных характеристик системы МО является
**среднее время обслуживания одной заявки** $T_{ОБ}$,
которое на практике обычно имеет экспоненциальное распределение:

$$f(t) = \nu_{ОБ} \cdot e^{-\nu_{ОБ} t} \qquad \nu_{ОБ} = \frac{1}{T_{ОБ}}$$

*f(t)* – плотность распределения функции распределения – универсальной характеристики распределения вида $F(x)=P(X<x)$, где $X<x$ – вероятность события, $X$ – некоторая текущая переменная.

Системы МО делятся на **системы с отказами** и **системы с ожиданием**.

В первых системах – заявка, поступившая в момент, когда все каналы обслуживания заняты, получает отказ;

во вторых системах – заявка становится в очередь и ожидает, пока не освободится какой-либо канал.

# Безотказность неремонтируемых и ремонтируемых изделий

Для неремонтируемых - показателями безотказности являются:

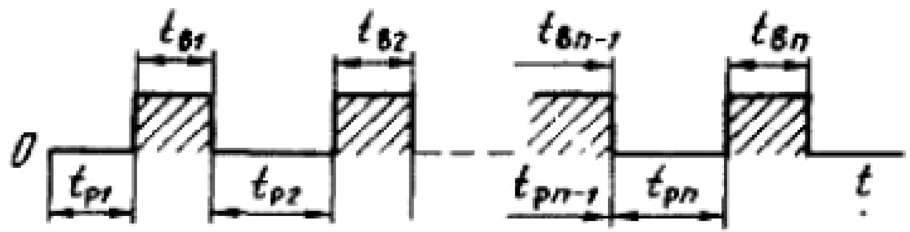
- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- частота отказов $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до первого отказа $T_{CP}$.

Для ремонтируемых характерно чередование исправного состояния и ремонта после отказа.
Появление отказов в каждом из N изделий рассматривается как поток требований для ремонта.
Поэтому показатели безотказности следующие:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- параметр потока отказов $\omega(t)$;
- средняя наработка на отказ $\overline{T_O}$ .

# Время восстановления

Для ремонтируемых объектов характерно чередование исправного состояния и ремонта после отказа (появление отказов в каждом из *N* объектов можно рассматривать как поток требований для ремонта):




Такие РЭС характеризуют **средним временем восстановления** $T_в$.

Допустим, какое-то количество изделий одного и того же типа эксплуатируется заданное время.
При этом регистрируется суммарное количество часов $t_в$, затраченное на отыскание и устранение каждой неисправности, и количество возникших отказов *N*.
Тогда **среднее время восстановления** $T_в \approx t_в / N$.

Следует иметь в виду, что время, затраченное на отыскание и устранение конкретной неисправности, может быть больше или меньше $T_в$.

# Параметр потока отказов

**Параметр потока отказов -** среднее число отказов за время рассматриваемого потока:

$$\bar{\omega} = \Delta n_i / (N \Delta t).$$

При этом число элементов в процессе опыта остается неизменным (отказавшие элементы заменяются новыми).

В сложном объекте (устройстве) результирующий поток отказов равен сумме потоков отказов отдельных устройств:

$$\omega_N = \sum_{i=1}^{N} \omega_i .$$

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(\Delta t)}{\Delta t} \qquad P(t_1, t_2) = \exp\left[ - \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt \right]$$

# Наработка на отказ

Для ремонтируемых объектов удобным для практики критерием надежности является среднее число часов работы между двумя соседними отказами, обычно называемое **наработкой на отказ** $T_o$.

Если РЭС определенного типа проработала суммарное время $t_\Sigma$ и имела при этом п отказов в работе, то наработка на отказ равна:

$$\overline{\overline{T}}_0 = t_\Sigma / n.$$

Если же испытаниям подвергаются *N* однотипных объектов, то необходимо просуммировать время исправной работы по всем объектам и разделить его на общее число отказов:

$$\overline{\overline{T}}_0 = \sum_{i=1}^{N} t_i \Big/ \sum_{i=1}^{N} n_i .$$

Для простейшего потока параметр потока отказов: $\overline{\omega} = 1 \big/ \overline{T}_0$

# Ремонтопригодность

Процесс ремонта, заключающийся в обнаружении и устранении отказа, является случайным. В качестве случайной величины берется среднее время ремонта, которое слагается из времени, затрачиваемого на обнаружение отказа, поиск причин его возникновения и устранение последствий отказа.

Для **количественной оценки ремонтопригодности** применяется два показателя:

- средняя продолжительность текущего ремонта $T_{тр}$
- средняя продолжительность технического обслуживания $T_{то}$

Средняя продолжительность текущего ремонта есть математическое ожидание времени восстановления работоспособности:

$$\overline{T}_{TP} = \left(\sum_{i=1}^{n} T_{Pi}\right) / n. \qquad T_{T.P} = \int_{0}^{\infty} T_{Pi} f(t_P) dt,$$

где $T_{pi}$ – время ремонта $i$-го объекта; $f(t_p)$ – плотность распределения случайной величины времени ремонта.

# Интенсивность ремонта

Величина, обратная средней продолжительности текущего ремонта , называется **интенсивностью ремонта** и характеризует количеством ремонтов, произведенных в единицу времени:

$$\mu_p = 1/\overline{T}_{m.p}$$

**Пример 2.3.** При эксплуатации радиоэлектронного устройства было зарегистрировано $n$ = 20 отказов, из них отказало: полупроводниковых приборов (ПП) – 6, резисторов и конденсаторов (Р и К) – 8, трансформаторов и дросселей (Т и Д) – 4, интегральных микросхем (ИС) – 2. На ремонт после выхода из строя ПП затрачивалось 15 мин, для Р и К – 10 мин, для Т и Д – 20 мин, для ИС – 25 мин. Найти среднее время ремонта.

**Пример 2.3.** При эксплуатации радиоэлектронного устройства было зарегистрировано $n$ = 20 отказов, из них отказало: полупроводниковых приборов (ПП) – 6, резисторов и конденсаторов (Р и К) – 8, трансформаторов и дросселей (Т и Д) – 4, интегральных микросхем (ИС) – 2. На ремонт после выхода из строя ПП затрачивалось 15 мин, для Р и К – 10 мин, для Т и Д – 20 мин, для ИС – 25 мин. Найти среднее время ремонта.

Решение.

1. Находим вес отказов по группе элементов $m_i = n_i / n$ .

$m_1 = 6/20 = 0,3$; $m_2 = 8/20 = 0,4$; $m_3 = 4/20 = 0,2$; $m_4 = 2/20 = 2,1$.

2. $\bar{T}_{T.P} = \sum_{i=1}^{4} t_{pi} m_i = 15 \cdot 0,3 + 10 \cdot 0,4 + 20 \cdot 0,2 + 25 \cdot 0,1 = 15 мин$.

Пример 2.3. Имеется простейшая 2-х канальная система МО с очередью. Интенсивность потока заявок $\lambda=3$ заявки в час. Среднее время обслуживания одной заявки $\overline{T}_{ОБ} = 0{,}5ч$. Найти вероятности состояний $P_0$, $P_1$, $P_2$, вероятность наличия очереди $P_{ОЧ}$, среднюю длину очереди $M_{ОЧ}$ и среднее время пребывания заявки в очереди $t_{ОЧ}$.

Имеем число заявок $\alpha_3 = \lambda \overline{T}_{ОБ} = 3 \cdot 0{,}5 = 1{,}5$. При этом число каналов $n=2$, т.к. $\alpha_3<n$, то режим установившийся. Из [9] для расчета вероятностей состояния системы при $\alpha_3<n$ воспользуемся формулой:

$$P_K = \frac{\alpha_3{}^k}{K!} / (\sum_{k=0}^{n} \frac{\alpha_3{}^k}{K!} + \frac{\alpha_3{}^{n+1}}{n! \cdot (n-\alpha_3)}, \qquad (2.3)$$

где $K$ – число состояний системы $(\ 0 \le к \le n\ )$.

Подставляя в формулу (2.3) численные значения, получим:

$P_0=1 / 7 = 0{,}142$,

$P_1=1{,}5 / 7 = 0{,}214$,

$P_2=1{,}125 / 7 = 0{,}16$.

Тогда вероятность наличия очереди:

$$P_{ОЧ} = 1-(P_0+P_1+P_2) = 1-(0{,}142+0{,}214+0{,}16) = 0{,}484.$$

Средняя длина очереди, т.е. среднее число заявок, находящихся в очереди:

$$M_{ОЧ} = \frac{\alpha_3{}^{n+1}}{n \cdot n! \cdot (1-\alpha_3/n^2)} / \sum_{k=0}^{n} \frac{\alpha_3{}^k}{K!} + \frac{\alpha_3{}^{n+1}}{n! \cdot (n-\alpha_3)}, \qquad (2.4)$$

т.е.

$$M_{ОЧ} = \frac{1{,}5^3}{2-1 \cdot 2(1-1{,}5/2)^2} / \sum_{K=0}^{2} \frac{1{,}5^k}{K!} + \frac{1{,}5^3}{1 \cdot 2 \cdot 0{,}5} = \frac{13{,}5}{7} = 1{,}92$$

Среднее время пребывания $t_{ОЧ} = M_{ОЧ} / \lambda = 1{,}92/3 = 0{,}64$.

# Количественные параметры надёжности

Итак для *количественного* выражения надежности, готовности и экономичности используются эксплуатационно-технические показатели:

1) показатели безотказности:
   а) для неремонтируемых изделий:
   - вероятность безотказной работы $P(t)$,
   - частота отказов $f(t)$,
   - средняя наработка на отказ $T_{CP}$;

   б) для ремонтируемых изделий:
   - вероятность безотказной работы $P(t)$,
   - параметр потока отказов $\omega(t)$,
   - средняя наработка на отказ $T_O$;
2) показатели ремонтопригодности:
   - средняя продолжительность текущего ремонта $T_P$;
   - средняя продолжительность техобслуживания $T_{TO}$;

3) показатели долговечности:

а) для неремонтируемых изделий:

- средний срок службы $T_{СЛ}$;
- средний срок службы до списания $T_{СП}$;
- гамма - процентный срок службы $T_{сл\gamma}$;
- средний ресурс $R_{СР}$;
- назначенный ресурс $R_{Н}$;
- гамма – процентный ресурс $R_{\gamma}$;

б) для ремонтируемых изделий:

- средний срок службы $T_{СЛ}$;
- средний срок службы до списания $T_{СП}$;
- гамма - процентный срок службы $T_{сл\gamma}$;
- средний срок службы до капитального ремонта (среднего ремонта) $T_{СЛК}$ $(T_{СЛср})$;
- средний срок службы между капитальными (средними) ремонтами $T_{СЛмк}$, $(T_{СЛмср})$;
- средний ресурс $R_{СР}$;
- назначенный ресурс $R_{Н}$;
- гамма – процентный ресурс $R_{\gamma}$;
- средний ресурс до капитального (среднего) ремонта $R_{К}$ $(R_{СР})$;
- средний ресурс между капитальными (средними) ремонтами $R_{мк}$ $R_{МСР}$,
- средний ресурс до списания $R_{СП}$;

4) показатели сохраняемости:

- средний срок сохраняемости $T_C$ ,
- гамма – процентный срок сохраняемости $T_{C\gamma}$ ;

5) показатели готовности:

- коэффициент готовности $K_Г$ ,
- коэффициент оперативной готовности $K_{ОГ}$ ,
- коэффициент технического использования $K_{ТИ}$ ;

6) эксплуатационно-экономические показатели:

- средняя трудоемкость текущего ремонта $S_{ТР}$ ,
- средняя трудоемкость ТО $S_{ТО}$ ,
- коэффициент эффективности профилактики $K_{ЭФТ}$,
- коэффициент стоимости эксплуатации $K_{СТэ}$ .

# По домам тарам-пам-пам!

k