Глава 3. Показатели надежности

3.1. Невосстанавливаемые объекты

Пусть при $t = 0$ объект начинает работу;

при $t = T$ происходит отказ объекта.

T – НСВ, которая называется **наработка до отказа.**

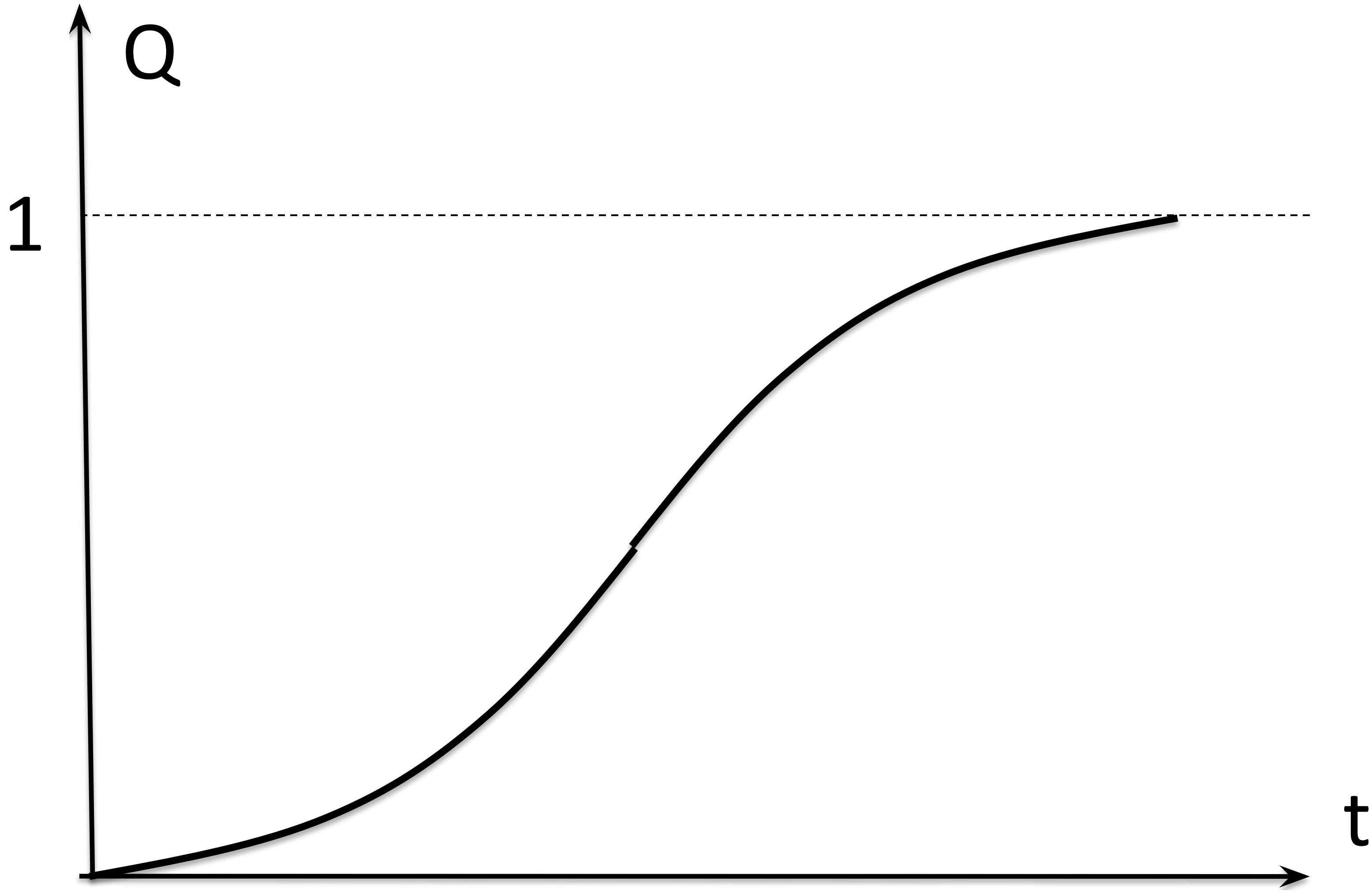
Обозначим функцию распределения этой НСВ $Q(t)$.

Назовём $Q(t)$ **функцией отказа.**

По определению:

$Q(t) = P(T < t)$ – вероятность отказа объекта до момента t.

Функция отказа



Введем понятие плотности вероятности отказа объекта f(t).

Аналитически:

f(t) = Q’(t).

Статистически:

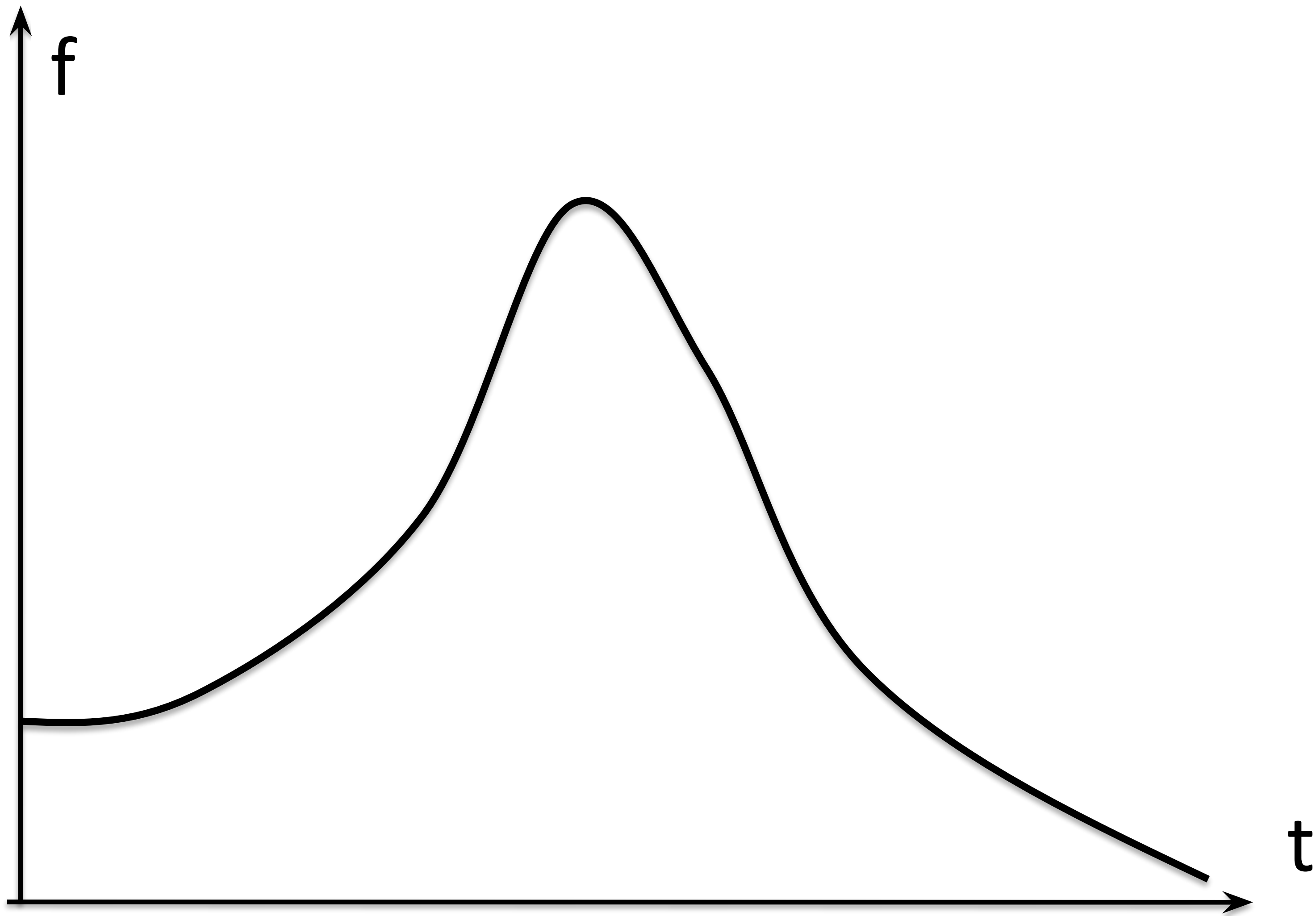
$$\hat{f}(t) = \frac{m(t+\Delta t) - m(t)}{N_0 \Delta t} = \frac{N(t) - N(t+\Delta t)}{N_0 \Delta t}$$

где m(t) – количество объектов, **отказавших** к моменту времени t;

N(t) – количество объектов, **исправных** к моменту времени t;

N_0 – количество объектов, **исправных** при t = 0.

Плотность вероятности отказа



Обозначим вероятность безотказной работы в течение времени t:

$R(t) = P(T > t)$

Назовём $R(t)$ **функцией надежности.**

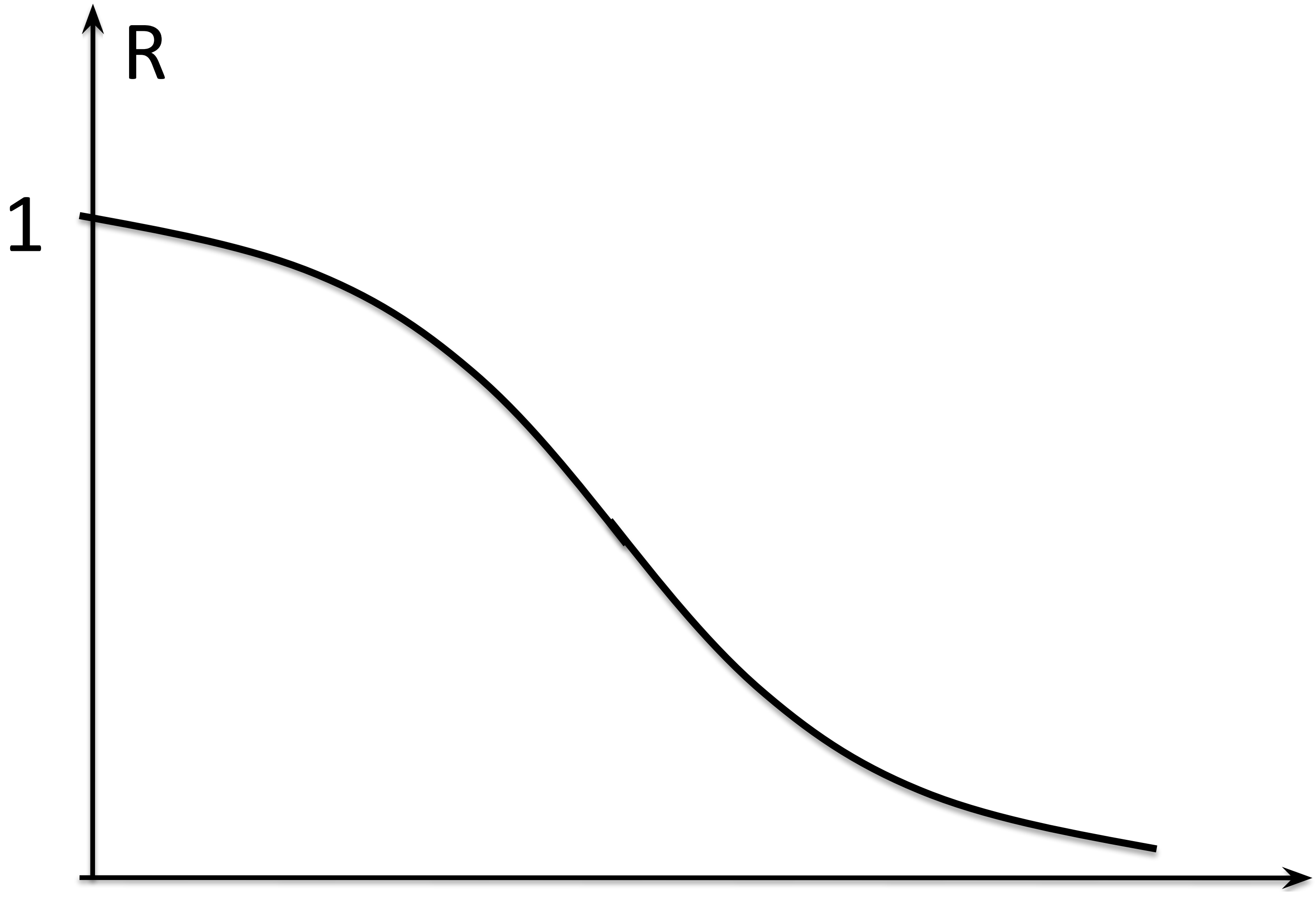
Аналитически:

$R(t) = 1 – Q(t)$.

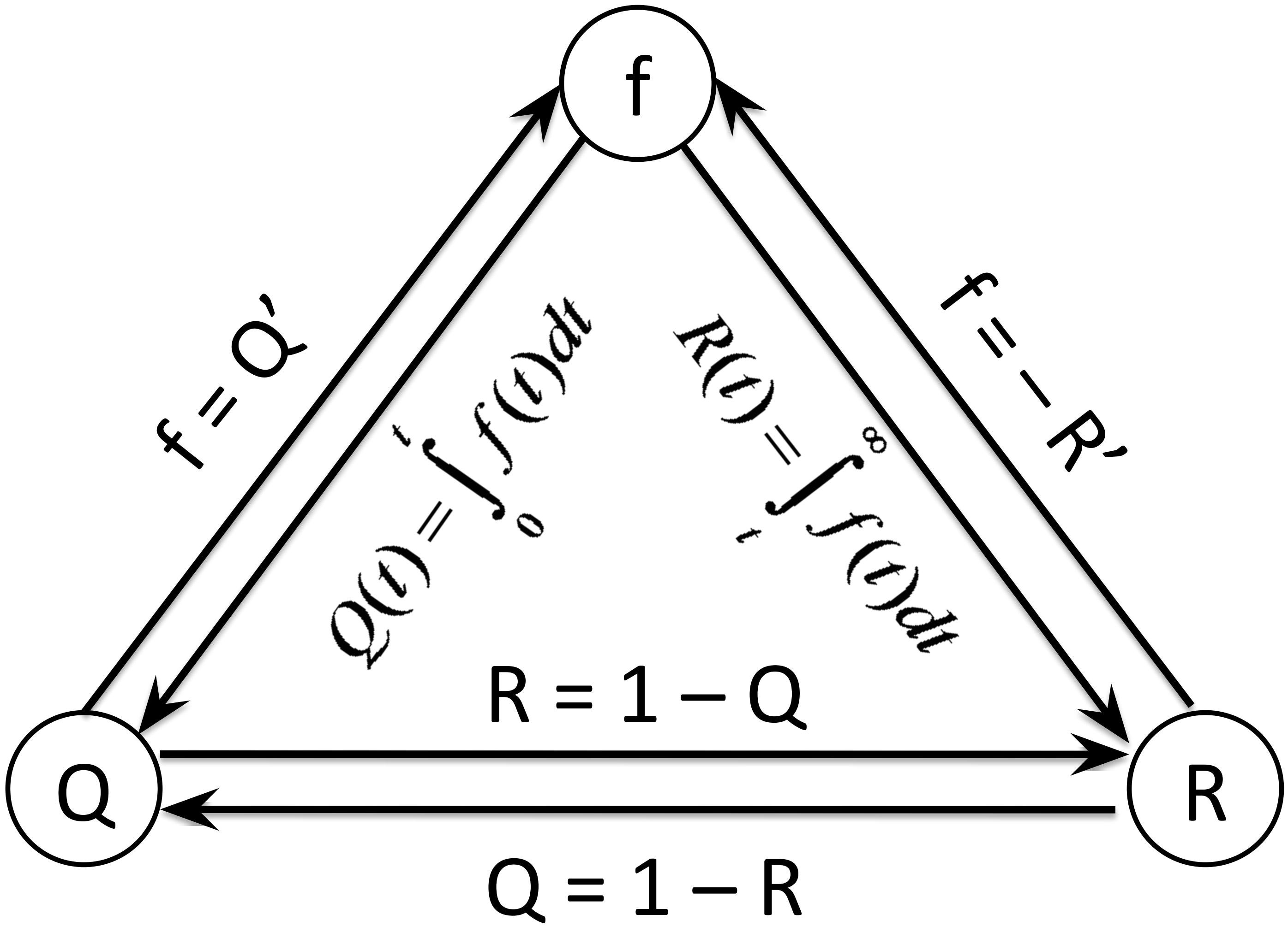
Статистически:

$$\hat{R}(t) = \frac{N(t)}{N_0}$$

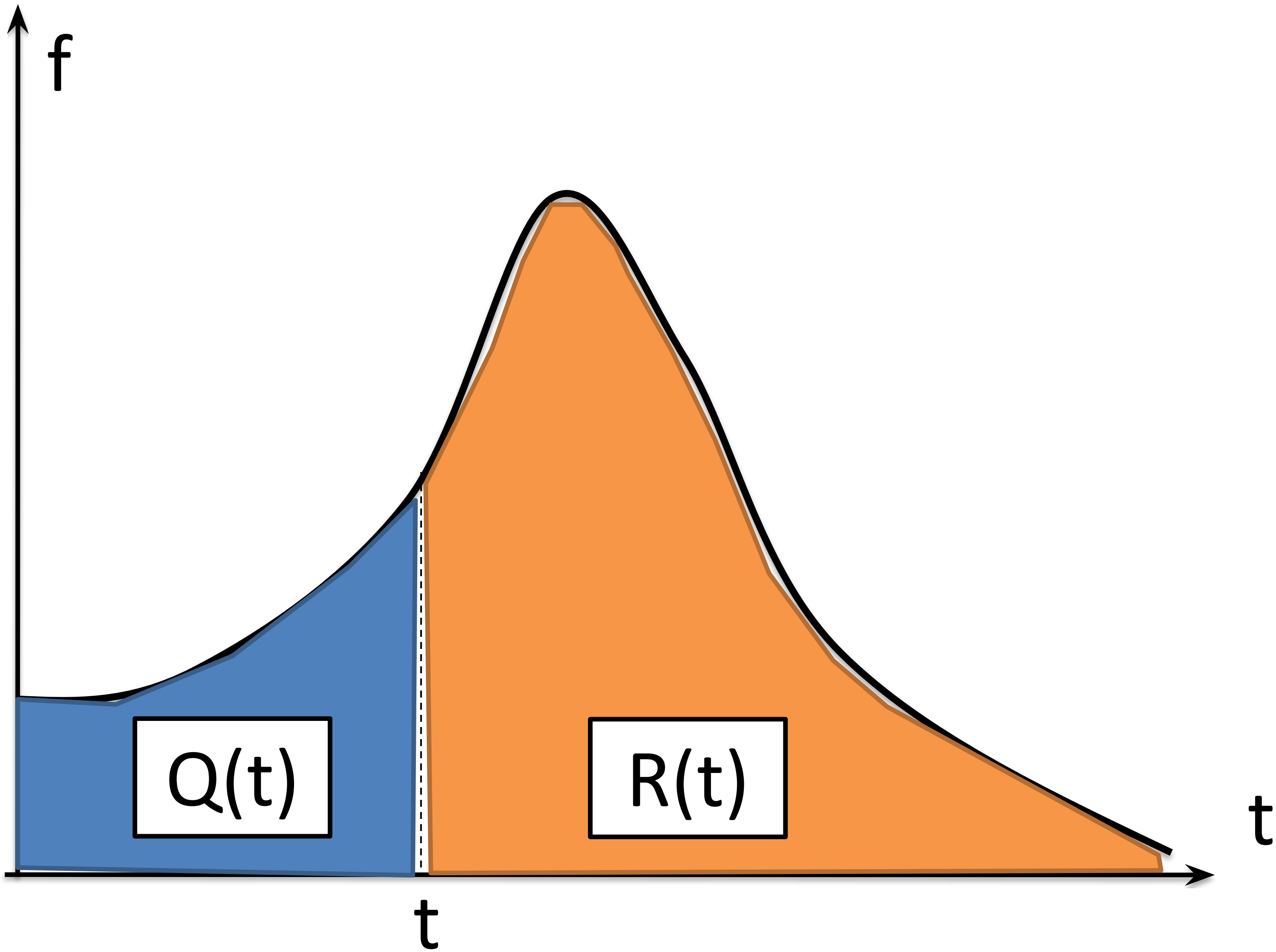
Функция надежности



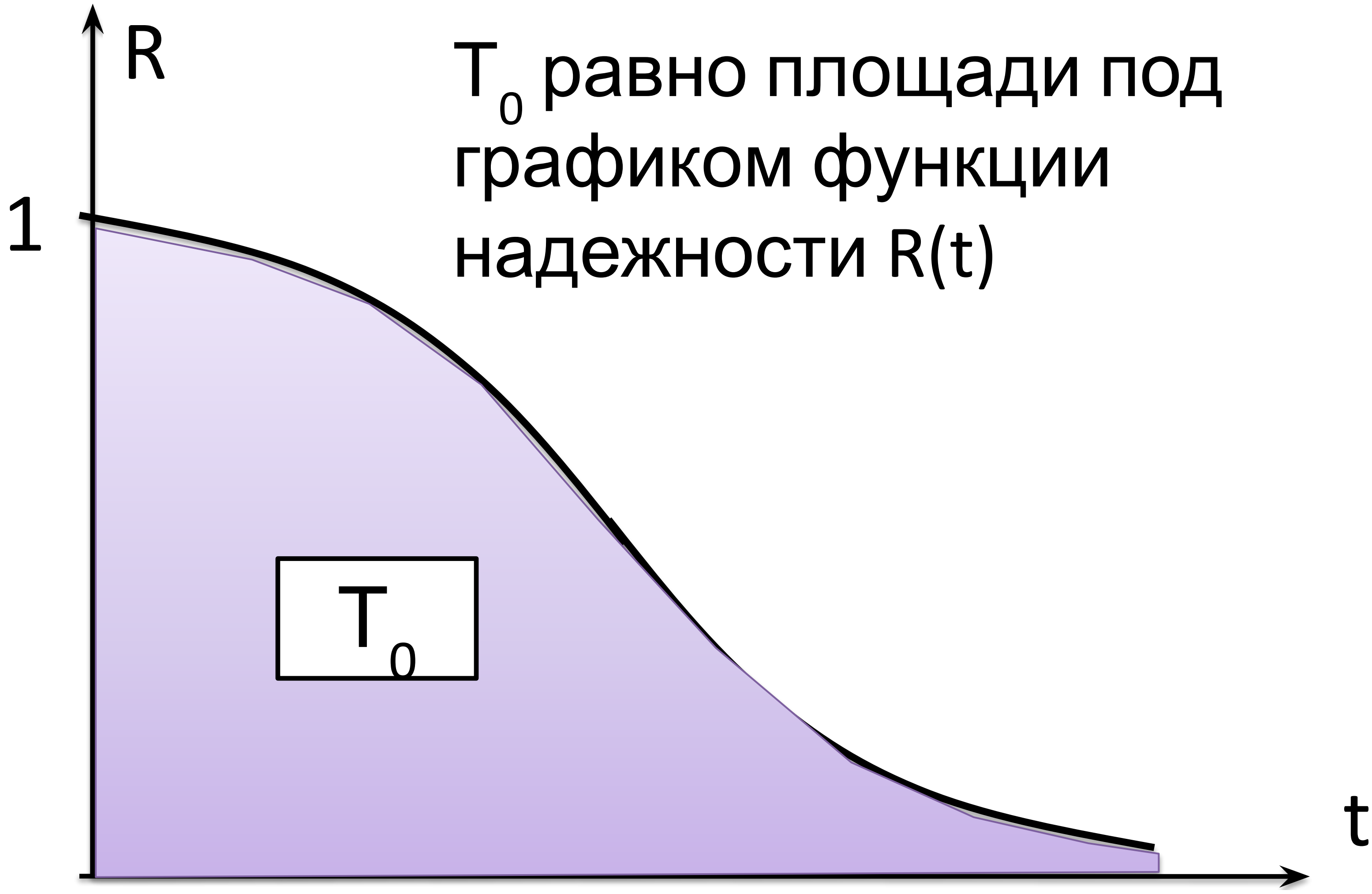
Связь между функциями Q, R, f



Графическая связь между функциями Q, R, f



Среднее время безотказной работы T_0



T_0 равно площади под графиком функции надежности R(t)

Среднее время безотказной работы T_0

Статистически:

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i$$

где

t_i – наработка до отказа i-го объекта;

N_0 – первоначальное количество исправных объектов.

Причём испытания проводят, пока все N_0 объектов не откажут.

Среднее время безотказной работы T_0

Если нет возможности дожидаться отказа всех объектов (из-за недостатка времени), то T_0 можно оценить так:

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{N_0}\left(\sum_{i=1}^{m} t_i + t(N_0 - m)\right)$$

где

t – время испытания;

m – число отказавших объектов за время t

Интенсивность отказов $\lambda(t)$

$[\lambda] = с^{-1}$, $ч^{-1}$, $год^{-1}$ и т. д.

Статистически:

$\lambda(t)$ – число отказов в единицу времени, отнесённое к числу безотказно проработавших до этого времени объектов.

С позиций теории вероятности:

$\lambda(t)$ – условная плотность вероятности отказа объекта при условии, что до рассматриваемого момента отказа не было.

Таким образом $\lambda(t)$ является локальной характеристикой надёжности, т.е. определяет надёжность объекта в каждый данный момент времени.

Интенсивность отказов λ(t)

Аналитически:

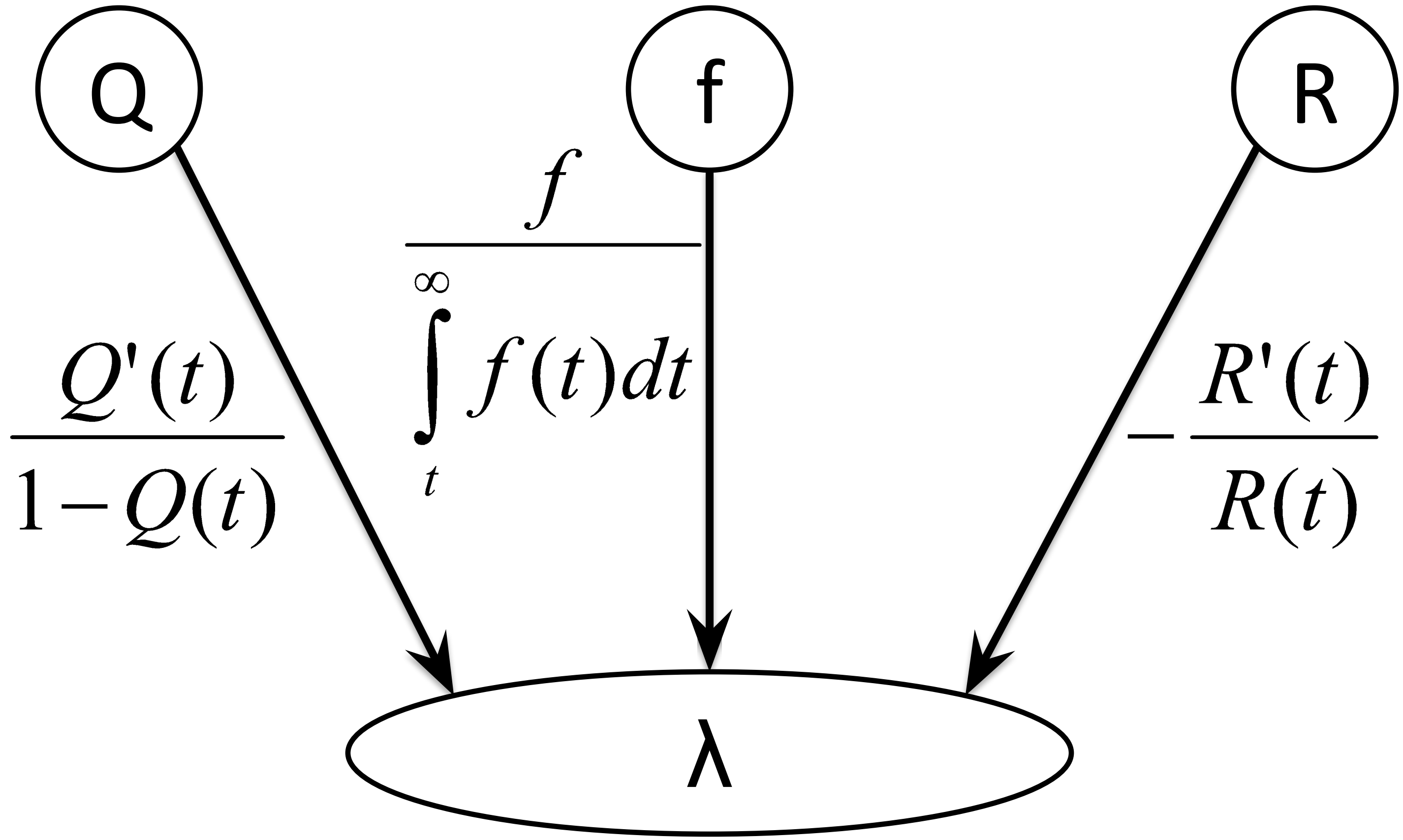
$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Статистически:

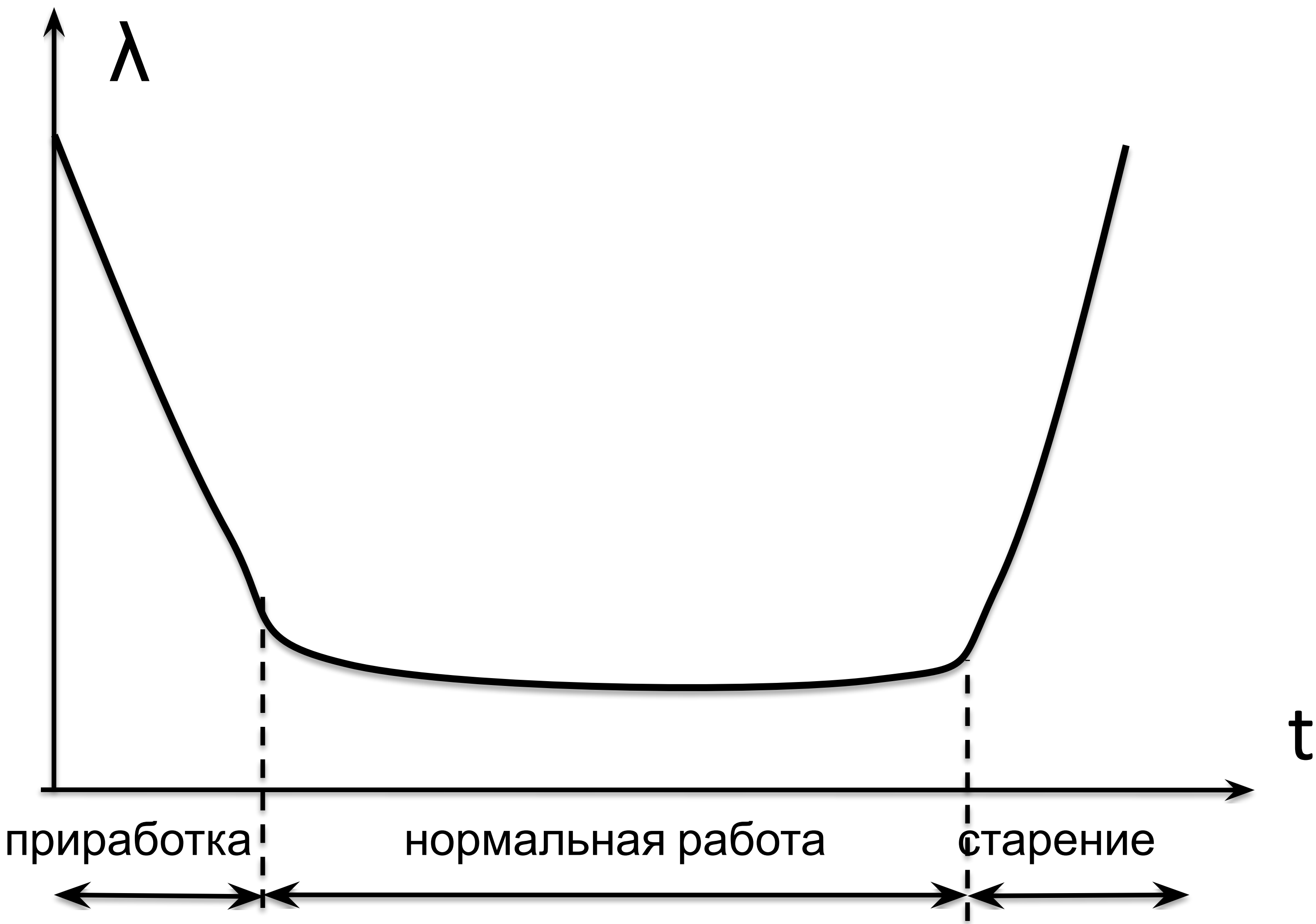
$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\dfrac{N(t)}{N_0} - \dfrac{N(t + \Delta t)}{N_0}}{\Delta t \cdot \dfrac{N(t)}{N_0}} = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot N(t)} = \frac{m(\Delta t)}{\Delta t \cdot N(t)}$$

где m(Δt) – количество отказов за время Δt.

Связь между функциями Q, R, f, λ



Интенсивность отказов



Для нормальной работы можно считать:

$\lambda(t) = \mathrm{const} = \lambda$

Тогда

$R(t) = \exp(-\lambda t)$

$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$

$f(t) = \lambda\exp(-\lambda t)$

$T_0 = 1/\lambda$

Получили экспоненциальный закон распределения с параметром λ.

При экспоненциальном законе вероятность безотказной работы на интервале $(t;\ t + \Delta t)$ не зависит от времени предшествующей работы t, а зависит только от продолжительности интервала Δt.

Доказательство:

$R(t;\ t + \Delta t) = \exp(-\lambda\Delta t)$

По формуле условной вероятности

$R(t;\ t + \Delta t) = R(t + \Delta t)\ /\ R(t) =$

$= \exp(-\lambda(t + \Delta t))\ /\ \exp(-\lambda t) =$

$= \exp(-\lambda(t + \Delta t) + \lambda t)$

Упрощение формул для малых времён t

В практических расчетах при малых временах рассмотренные выше формулы упрощают, используя соотношение из теории эквивалентов:

$\exp(x) \sim 1 + x$ при $x \to 0$

Тогда

$R(t) = 1 - \lambda t$

$R(t;\ t + \Delta t) = 1 - \lambda \Delta t$

$Q(t) = \lambda t$

Эти зависимости верны для малых λt (т.е. $t \ll$

3.2. Объекты с мгновенным восстановлением

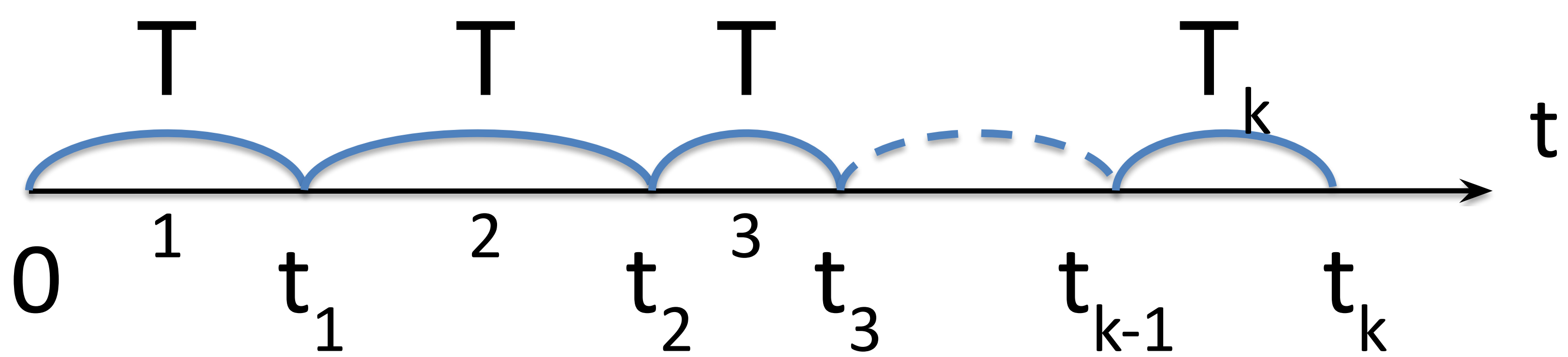
- Эксплуатация восстанавливаемого объекта не прекращается при его отказе.

- Объект ремонтируется или заменяется новым.

- Наработка между отказами и продолжительность восстановления являются НСВ.

- Рассмотрим ситуацию, когда время восстановления << наработки между отказами

Поток отказов объекта с мгновенным восстановлением

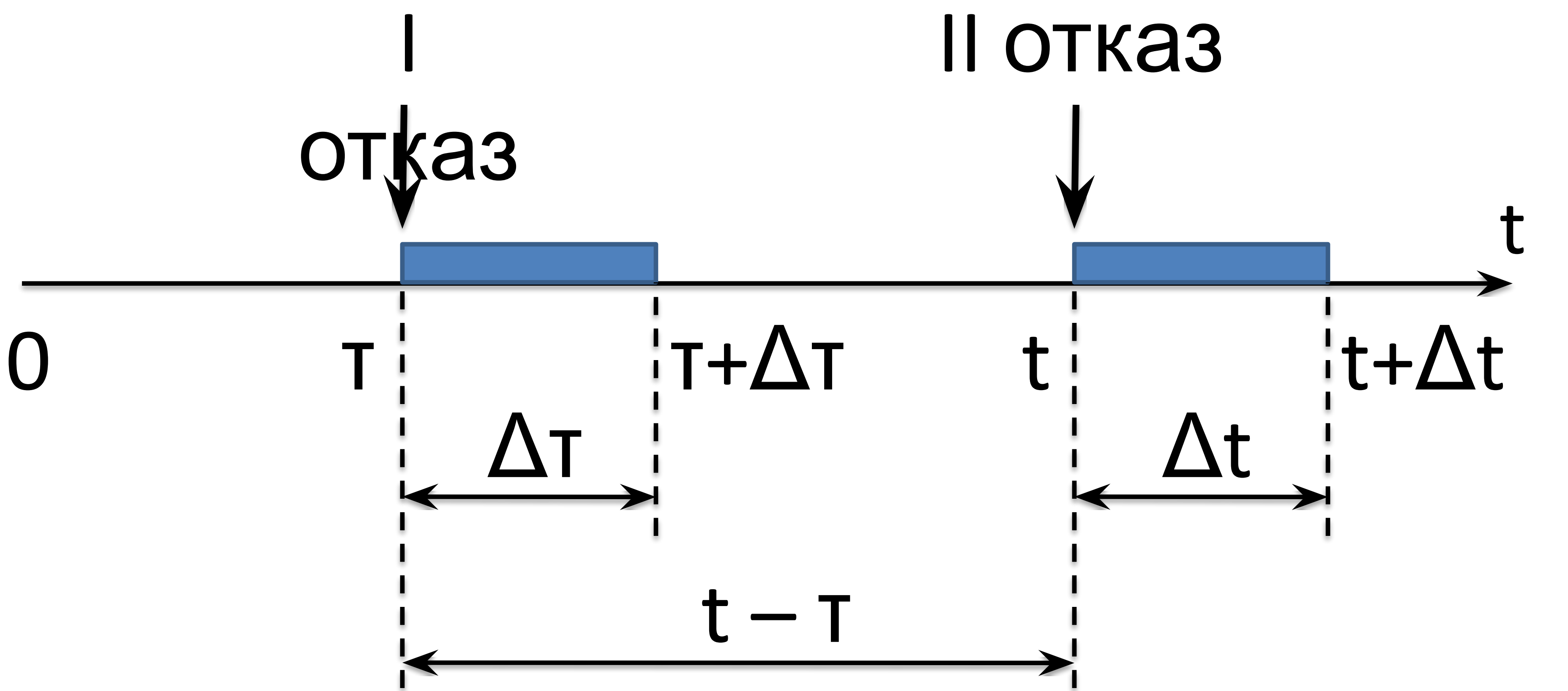


Рассмотрим плотности вероятностей времени:

- до первого отказа $f_1(t)$;
- до второго отказа $f_2(t)$;
- …
- до k-го отказа $f_k(t)$.

- Пусть первый отказ произошёл в момент τ;
- пусть второй отказ произошёл в момент t.

Рассмотрим первые 2 отказа объекта



Выведем формулу для $f_2(t)$

Наработка на второй отказ равна t – τ.

Рассмотрим вероятность того, что второй отказ произойдёт на интервале (t; t + Δt):

$$\Delta f_2(t)\,\Delta t = f_1(\tau)\,\Delta\tau \cdot f_1(t-\tau)\,\Delta t$$

Разделим на Δt и проинтегрируем по τ от 0 до t:

$$f_2(t) = \int_0^t f_1(\tau) f_1(t-\tau)\,d\tau$$

Обобщим этот результат на k отказов. Выведем формулу для $f_k(t)$.

$$f_k(t) = \int_0^t f_{k-1}(\tau) f_1(t-\tau) d\tau$$

Пояснение:

Дошли до (k – 1)-го отказа,

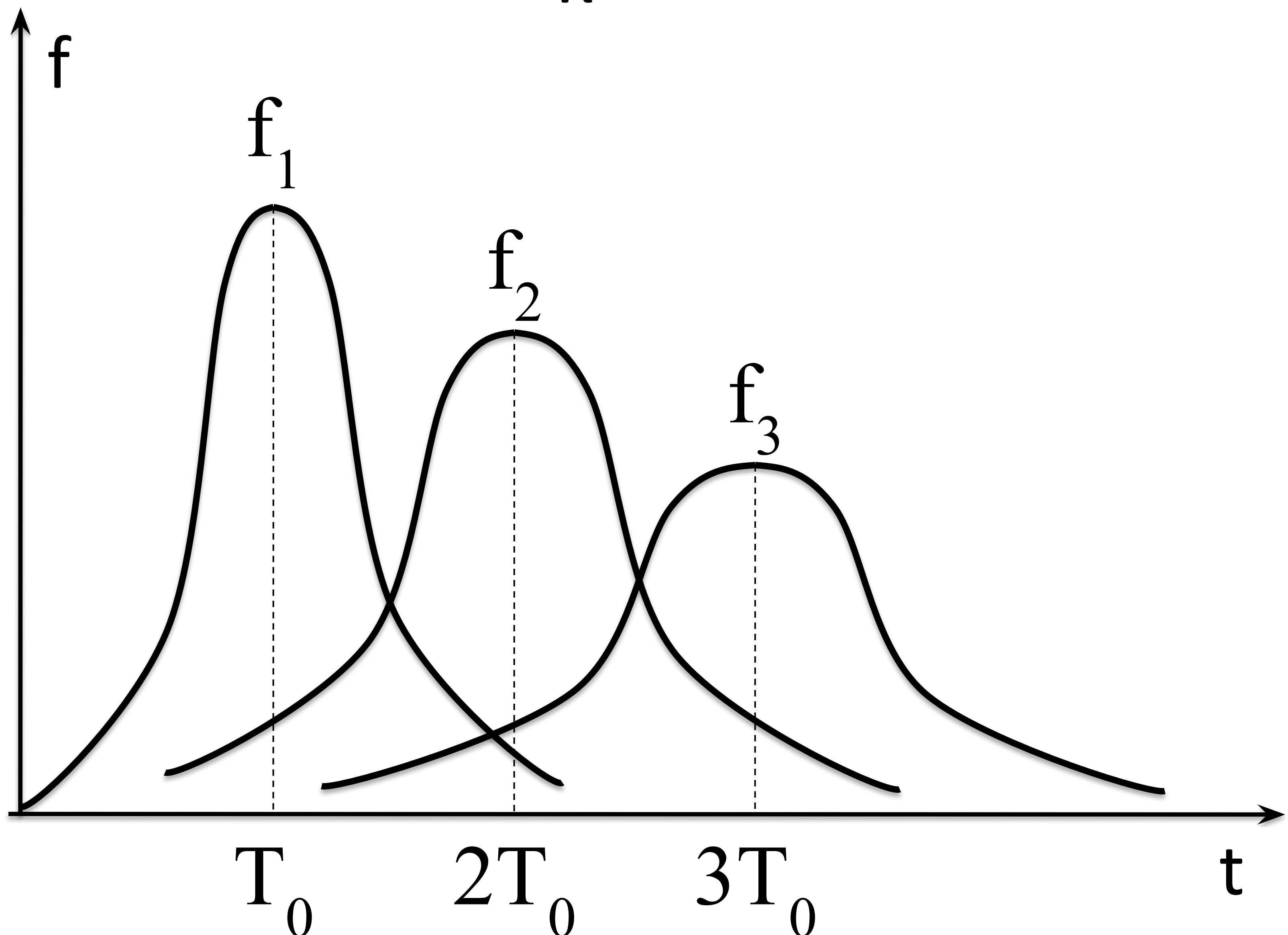
зафиксировали накопившуюся вероятность

и начали отсчёт времени с нуля.

Значит, следующий отказ будет первым =>

=> в интеграле имеется $f_1(t)$.

Построим графики $f_k(t)$ для разных k



Свойства графиков $f_k(t)$

1) Каждый график $f_k(t)$ имеет максимум в точке
$t = kT_0$.
2) Каждый график $f_k(t)$ приблизительно симметричен относительно оси $t = kT_0$.
3) Максимальное значение функции $f_k(t)$ уменьшается с ростом k, т.к. накапливаются неопределённости по предыдущим наработкам.
4) Кривая $f_k(t)$ становится более пологой (широкой) с ростом k.

Параметр потока отказов $\omega(t)$

Назовём сумму

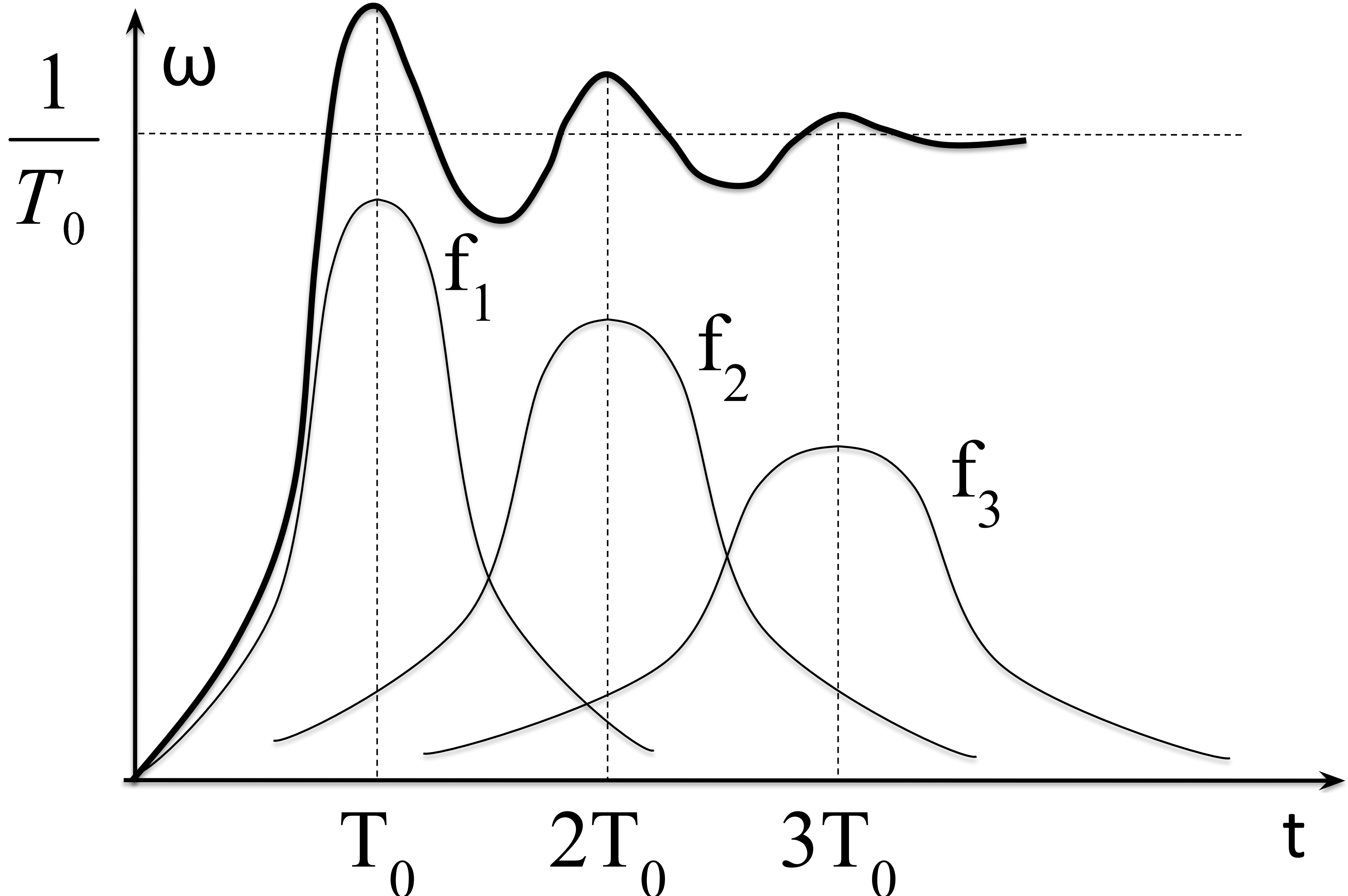
$f_1(t) + f_2(t) + \ldots + f_k(t) = \omega(t)$

параметром потока отказов.

По сути $\omega(t)$ – это плотность вероятности отказа.

С одной стороны функция $\omega(t)$ является локальной по времени, с другой стороны она охватывает одновременно все отказы, т.е. является глобальной по отказам.

Построим график ω(t)



Свойство графика $\omega(t)$

1) График $\omega(t)$ имеет максимумы в точках $t = kT_0$.
2) Кривая $\omega(t)$ стабилизируется с течением времени и с ростом k на уровне $1/T_0$, т.е. процесс возникновения отказов становится стационарным, его локальные характеристики перестают зависеть от времени.

Свойства потоков отказов

Потоки отказов могут обладать свойствами:

1) Свойство **ординарности**. Вероятность совмещение 2-х и более отказов в один момент времени равна нулю.
2) Свойство **отсутствия последействия**. Числа отказов для любых неперекрывающихся интервалов времени независимы.
3) Свойство **стационарности**. Вероятность появления k отказов на любом промежутке времени зависит только от числа k и от длительности Δt и не зависит от начала отсчёта времени.

Виды потоков отказов

- Если выполняется (1), то поток **ординарный**.
- Если выполняются (1) и (2), то поток **пуассоновский**.
- Если выполняются (1), (2), (3), то поток **простейший**.

Для простейшего потока:

$$f_1(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$$

$$f_2(t) = \lambda^2 \exp(-\lambda t)$$

$$\ldots$$

$$f_k(t) = \lambda^k \frac{t^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\lambda t)$$

$$\omega(t) = \lambda$$

$$T_0 = 1/\lambda$$

Для простейшего потока:

Вероятность k отказов за время t:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \exp(-\lambda t)$$

Вероятность безотказной работы за время t:

$$P_0(t) = \exp(-\lambda t)$$

3.3. Объекты с конечным временем восстановления

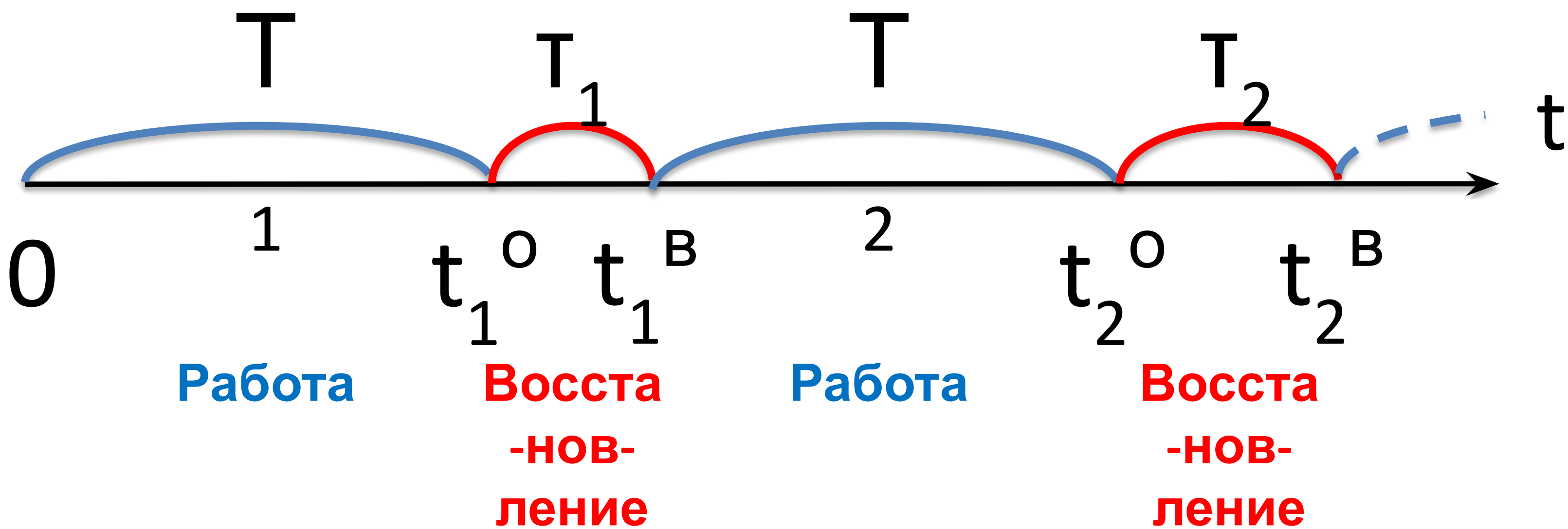
Время восстановления $\tau = t_п + t_р$

- $t_п$ – поиск неисправности;
- $t_р$ – ремонт или замена.

Пусть объект, проработав время T_1, выходит из строя и восстанавливается в течение τ_1.

Восстановленный объект через T_2 вновь отказывает, за τ_2 снова восстанавливается и т.д.

Поток отказов объекта с конечным временем восстановления



Сделаем допущения:

1) T_k, τ_k – независимые НСВ.

2) Все периоды работы T_k имеют:
- законы $F(t)$, $f(t)$;
- среднюю наработку на отказ $T = M(T_k)$;
- интенсивность отказов $\lambda = 1/T$.

3) Все периоды восстановления τ_k имеют:
- законы $G(t)$, $g(t)$;
- среднее время восстановления $\tau = M(\tau_k)$;
- интенсивность восстановлений $\mu = 1/\tau$.

4) Поток отказов и восстановлений – простейший.

Введём понятие **коэффициента готовности** Кг(t)

Кг(t) – это вероятность того, что в момент времени t объект находится в работоспособном состоянии (РСС).

Найдём зависимость Кг(t).

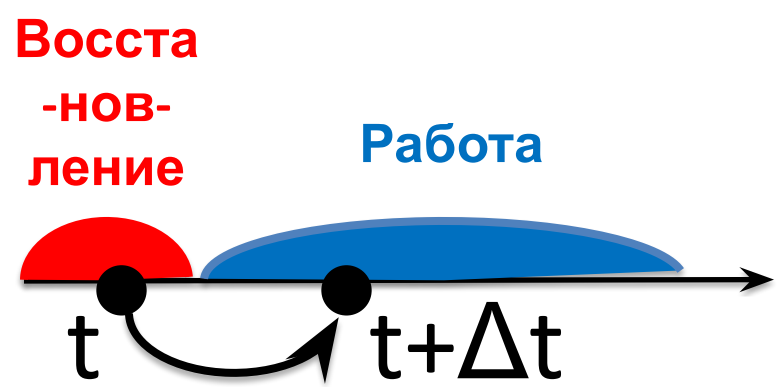
Вероятность застать объект в РСС в момент (t + Δt) зависит от его состояния в момент t и его поведения на интервале Δt.

Две гипотезы РСС объекта в момент времени t

H1:
изначально объект работал, далее за время Δt работал безотказно

H2:
изначально объект восстанавливался (т.е. не работал), далее за время Δt успел восстановиться

$R(\Delta t)$



$G(\Delta t)$

По формуле полной вероятности:

$$P(A) = P(H_1) \cdot P(A|H_1) + P(H_2) \cdot P(A|H_2)$$

$$Кг(t + \Delta t) = Кг(t) \cdot R(\Delta t) + (1 - Кг(t)) \cdot G(\Delta t)$$

Вероятность РСС

Вероятность безотказной работы

Вероятность НРСС

Вероятность восстановления

В разделе 3.1 доказано, что:

$R(\Delta t) = 1 - \lambda\Delta t$;

$G(\Delta t) = \mu\Delta t$.

Подставим:

$$K_г(t + \Delta t) = K_г(t) - K_г(t)\lambda\Delta t + \mu\Delta t - K_г(t)\mu\Delta t$$

$$K_г(t + \Delta t) - K_г(t) = - K_г(t)(\lambda + \mu)\Delta t + \mu\Delta t.$$

$$K_г'(t) + (\lambda + \mu)K_г(t) = \mu.$$

Решив это уравнение, найдем:

$$K_г(t) = \frac{\mu}{\mu+\lambda} + \frac{\lambda}{\mu+\lambda}\exp(-(\mu+\lambda)t)$$

Статистически:

$$\hat{K}_{\Gamma} = \frac{N(t)}{N_0}$$

$$\hat{K}_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^{m} T_i + (N_0 - m)t}{\sum_{i=1}^{m} T_i + \sum_{i=1}^{m} \tau_i + (N_0 - m)t}$$

Коэффициент неготовности – вероятность нахождения объекта в НРСС.

- Кнг = 1 – Кг
- Кнг(0) = 0
- Кнг(∞) = λ/(λ+μ) = τ/(T+τ)
- график Кнг(t)

Коэффициент аварийного простоя – относительная длительность восстановления.

- qав = λ/μ = τ/T

Глава 4. Вероятностные модели для расчёта надёжности

4.1. Общие положения

- Система состоит из множества элементов.
- Надёжность системы зависит от надёжности её элементов и от её конфигурации.
- Каждый элемент системы и сама система могут находиться только в двух состояниях – работы или отказа.
- Если все элементы системы работают, то и сама система тоже работает.
- Если все элементы отказали, то и система отказала.

Введем обозначения

A_i – событие безотказной работы i-го элемента;

$\bar{A}_i$ – событие отказа i-го элемента;

A_c – событие безотказной работы системы;

$\bar{A}_c$ – событие отказа системы;

Системы отображаются в виде:

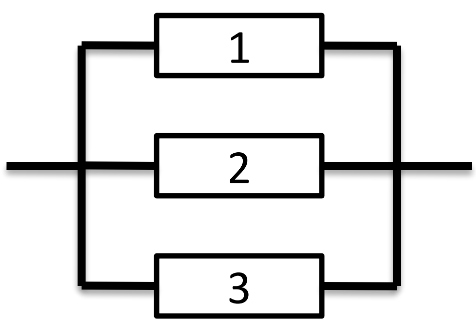
- физических схем:
  они имеют действительные, электрические связи;
- логических (расчётных) схем:
  они отражают логические связи, в смысле надёжности.

- Отказом системы считают отсутствие связи между началом и концом логической схемы.

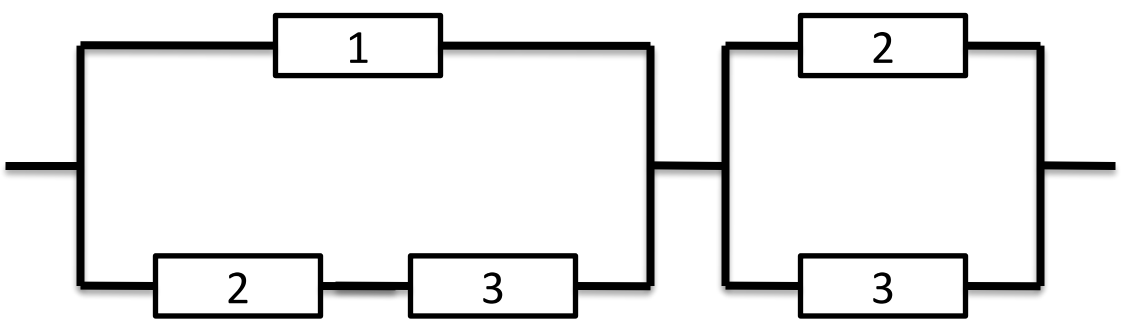
Пример

Потребитель мощностью 3 МВт получает электропитание от 3-х одинаковых линий с пропускной способностью 2 МВт каждая.

Физическая схема



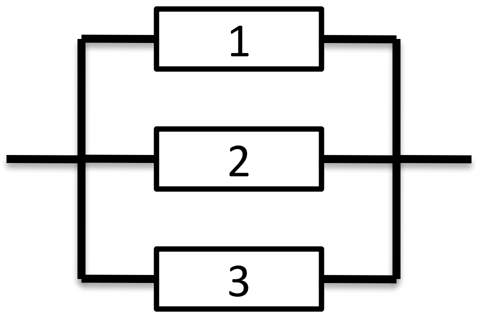
Логическая схема



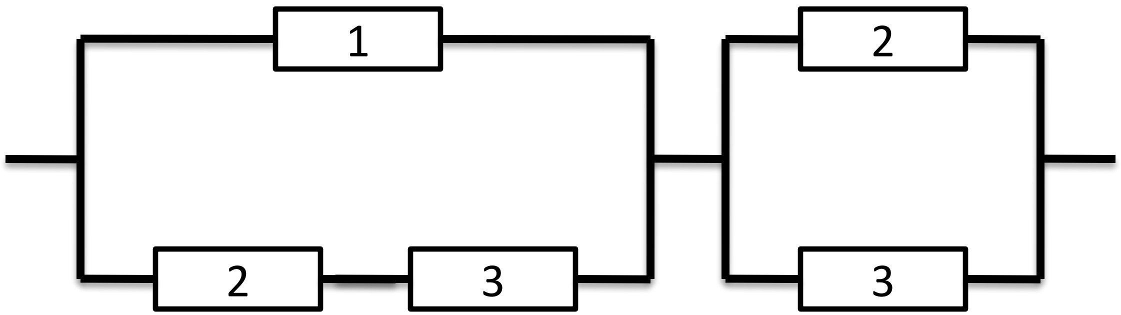
Докажем справедливость логической схемы с помощью таблицы истинности

1	2	3	Отказ	Разрыв
0	0	0	**Да**	**Да**
0	0	1	**Да**	**Да**
0	1	0	**Да**	**Да**
0	1	1	**Нет**	**Нет**
1	0	0	**Да**	**Да**
1	0	1	**Нет**	**Нет**
1	1	0	**Нет**	**Нет**
1	1	1	**Нет**	**Нет**

Физическая схема



Логическая схема



4.2. Последовательное соединение элементов

Последовательным (в смысле надёжности) называют такое соединение, при котором отказ одного элемента приводит к отказу всей системы, но не изменяет надёжности других элементов.

Тогда вероятность безотказной работы системы равна системы равна произведению б.о.р. всех элементов:

$P(A_c) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \ldots \cdot P(A_n)$

4.2.1. При отсутствии восстановления элементов

Вероятность б.о.р. системы, состоящей из независимых и невосстанавливаемых элементов в течение времени t:

$$R_c(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \ldots \cdot R_n(t)$$

Т.к. $R_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, то

$$R_c(t) = \exp(-\lambda_1 t) \cdot \exp(-\lambda_2 t) \cdot \ldots \cdot \exp(-\lambda_n t) =$$

$$= \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n)t)$$

С другой стороны

$R_c(t) = \exp(-\lambda_c t)$

Значит

$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n$

$1/T_c = 1/T_1 + 1/T_2 + \ldots + 1/T_n$;

$T_c = 1/(1/T_1 + 1/T_2 + \ldots + 1/T_n)$

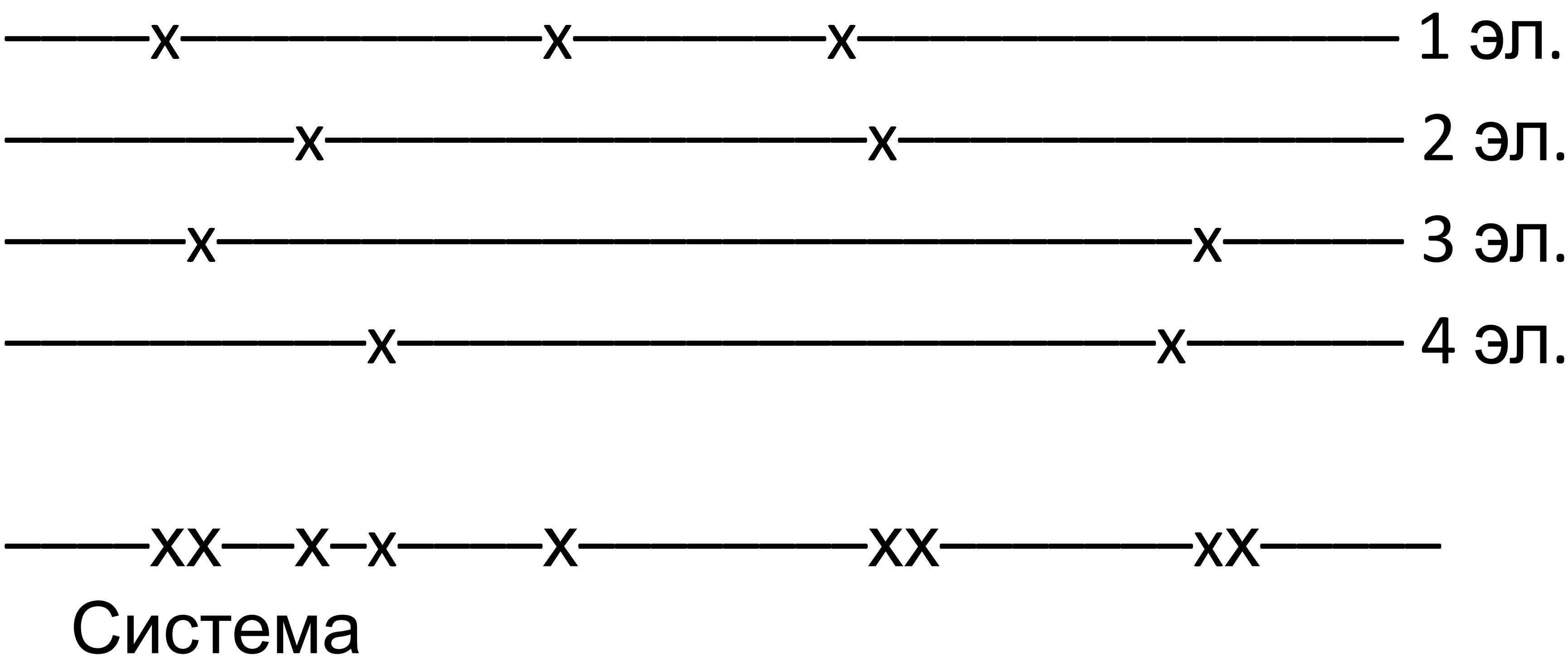
4.2.2. При мгновенном восстановлении элементов

Число отказов системы равно сумме чисел отказов элементов.

Допустим, за время t:

- элемент 1 претерпевает h_1 отказов;
- элемент 2 претерпевает h_2 отказов;
- …
- элемент n претерпевает h_n отказов.

Рассмотрим поток отказов системы:



$$h_c = h_1 + h_2 + \ldots + h_n \quad \Rightarrow \quad \lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n$$

Вероятность появления k отказов на интервале Δt:

$$P_k(\Delta t) = \frac{\left(\lambda_C \Delta t\right)^k}{k!} \exp(-\lambda_C \Delta t)$$

Вероятность б.о.р. системы:

$R(t) = \exp(-\lambda_c t) = \exp(-t/T_c)$

4.2.3. При конечном времени восстановления

В этом случае при отказе элемента, на время его восстановления отключается вся система.

После окончания восстановления элемента все элементы начинают работать так, как если бы восстановление происходило мгновенно.

Дано:

последовательность средних периодов б.о.р. элементов:

$T_1, T_2, \ldots;$

со средним временем б.о.р. системы:

$T_c = 1/(1/T_1 + 1/T_2 + \ldots)$

и последовательность средних периодов восстановления элементов:

$\tau_1, \tau_2, \ldots$

Найти среднюю длительность восстановления системы τ_c

Решение

Вероятность отказа i-го элемента на отрезке Δt:

$\lambda_i \Delta t$

Вероятность отказа системы на отрезке Δt:

$\lambda_c \Delta t$

Тогда условная вероятность отказа i-го элемента при условии, что на этом же интервале отказала система, равна:

$\lambda_i \Delta t / \lambda_c \Delta t = \lambda_i / \lambda_c$

По формуле полной вероятности найдём распределение длительности восстановления для системы, начавшегося в момент t:

$G_{\ }(t) =$

$$G_c(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\lambda_c} G_i(t)$$

$$G_i(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}$$

$$\tau_c = \int_0^{\infty} \left(1 - G_c(t)\right) dt = \int_0^{\infty} \left(1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\lambda_c} G_i(t)\right) dt =$$

$$= \int_0^{\infty} \left(1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\lambda_c} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right)\right) dt =$$

Формулы для средней длительности восстановления системы

$$\tau_c = \frac{1}{\lambda_c}\sum_{i=1}^{n}\frac{\lambda_i}{\mu_i}$$

$$\tau_c = T_c\sum_{i=1}^{n}\frac{\tau_i}{T_i}$$

Выведем коэффициент готовности системы через T_i, τ_i

$$K_{rc} = \frac{T_c}{T_c + \tau_c} =$$

Коэффициент готовности системы

$$K_{rc} = \frac{T_c}{T_c + \tau_c} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{\tau_i}{T_i}}$$

4.3. Параллельное соединение элементов

4.3.1. Резервирование одного элемента (n-1) резервным

Система с параллельным (в смысле надёжности) соединением элементов выходит из строя только в случае отказа всех её элементов.

Вероятность отказа такой системы равна:

$$P(\overline{A}_c) = P(\overline{A}_1) \cdot P(\overline{A}_2) \cdot \ldots \cdot P(\overline{A}_n)$$

(при этом считаем, что отказы всех элементов независимы).

Вероятность б.о.р. системы равна:

$$P(A_c) = 1 - (1 - P(A_1)) \cdot (1 - P(A_2)) \cdot \ldots \cdot (1 - P(A_n))$$

Вероятность отказа системы:

$$Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot \ldots \cdot Q_n(t)$$

Вероятность б.о.р. системы равна:

$$R_c(t) = 1 - (1 - R_1(t)) \cdot (1 - R_2(t)) \cdot \ldots \cdot (1 - R_n(t))$$

При равнонадежных элементах и экспоненциаль-ном законе:

$Q_c(t) = (1 – \exp(– \lambda t))^n$,

где λ – частота отказа элемента схемы.

Вычислим среднее время б.о.р. системы:

$$T_c = \frac{1}{\lambda}\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \ldots + \frac{1}{n}\right)$$

При $n \to \infty$

$T_c = \ln(n)/\lambda$

Например:

$n = 100$: $T_c = 4{,}6/\lambda$

$n = 1\,000$: $T_c = 6{,}9/\lambda$

$n = 10\,000$: $T_c = 9{,}2/\lambda$

Вычислим параметры системы T_c , τ_c , λ_c , μ_c через параметры равнонадёжных элементов T, τ, λ, μ:

Вывод формул выполним через величины:

q_c , q – вероятности застать систему и элемент в состоянии простоя

$$T_c = T / n\tau^{n-1} ;$$

$$\tau_c = \tau / n ;$$

$$\lambda_c = n\lambda / \mu^{n-1} ;$$

$$\mu_c = n\mu$$

4.3.2. Резервирование r рабочих элементов (n – r) резервными

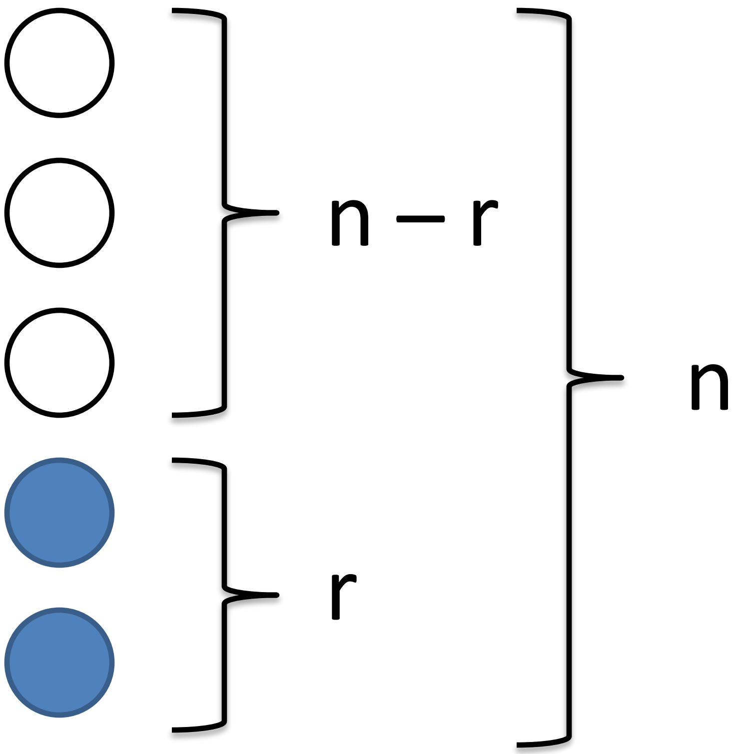
Пусть система состоит из n элементов.

Пусть для нормального функционирования системы необходимо r элементов.

Тогда остальные (n – r) элементов являются резервными.

Отказ системы наступает при выходе из строя (n – r + 1) элементов.

Пример



$k = (n - r) / r$ – кратность резервирования

Как рассчитать функции надежности Rc и отказа Qc всей системы, зная Ri и Qi каждого элемента?

В общем виде – громоздкое выражение, поэтому примем допущение, что все элементы равнонадёжны и имеют функции
$R_1 = R_2 = \ldots = R$,
$Q_1 = Q_2 = \ldots = Q$.

Сначала выведем формулы для частного случая.

Пример

Дано:

$n = 5$

$r = 2$

$n – r + 1 = 4$

$k = 1,5$

R

Q

Найти:

Rc

Qc

Решение

Очевидно, что для системы:

$Rc + Qc = 1$

и для каждого элемента:

$R + Q = 1$

Отсюда следует, что:

$\underline{Rc} + Qc = (R + Q)^5 =$

$= \underline{R^5 + 5R^4Q + 10R^3Q^2 + 10R^2Q^3} + 5RQ^4 + Q^5$

Обобщим результаты этого примера

$$R_C = \sum_{i=r}^{n} C_n^i R^i Q^{n-i}$$

$$Q_C = \sum_{i=n-r+1}^{n} C_n^i R^{n-i} Q^i$$

Виды резервирования

По способу включения резервных элементов резервирование бывает:

- **постоянное** (резервные объекты включены в систему в течение всего времени работы и находятся в одинаковых с другими объектами условиях)

- **замещением** (резервные объекты включают в систему вместо основных после отказа последних)

Постоянное резервирование (неявное)

Отказавший элемент должен **отключаться** защитной аппаратурой, надёжность которой будет определять надёжность всей схемы.

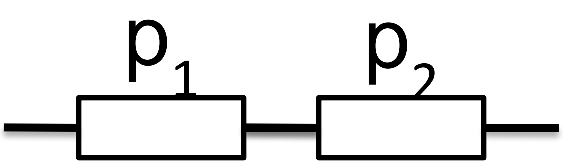
Резервирование замещением (явное)

Отказавший элемент должен **отключаться** защитной аппаратурой, а резервный элемент должен **включаться** аппаратурой автоматики.

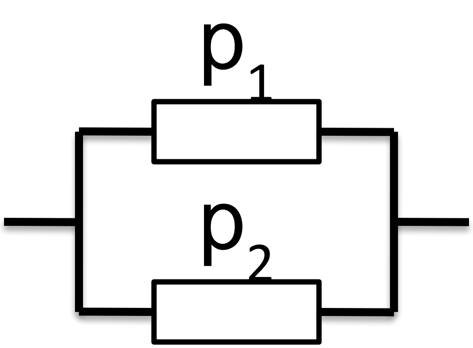
Надёжность этих видов аппаратуры будет определять надёжность всей схемы.

4.4. Последовательно-параллельное соединение элементов

В этом случае логическая схема поэтапно эквивалентируется до одного элемента.



$$p_{экв} = p_1 p_2$$

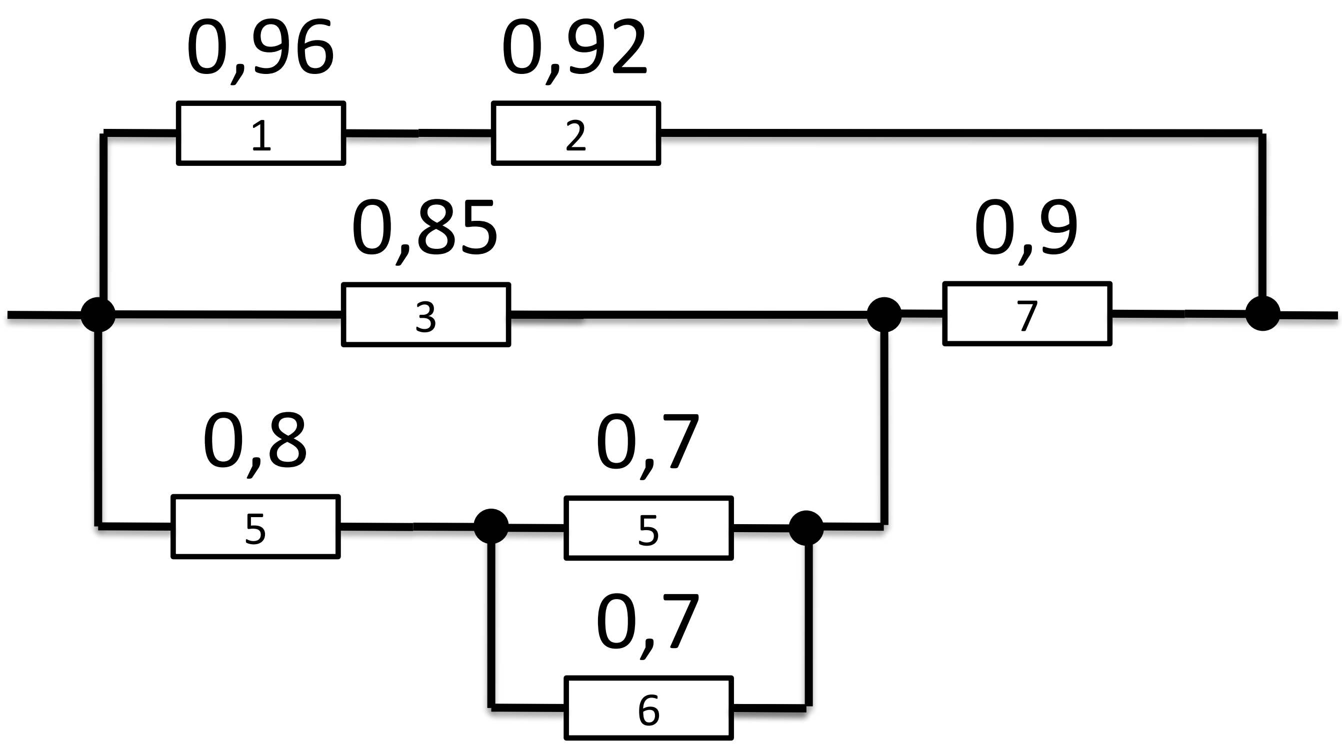


$$p_{экв} = p_1 + p_2 - p_1 p_2$$

Полезно помнить, что:

- при последовательном соединении $p_{общ}$ меньше меньшего;
- при параллельном соединении $p_{общ}$ больше большего, но меньше 1.

Пример



$$P\left(A_{1,2}\right)=P\left(A_1 \cap A_2\right)=0,96\cdot 0,92=0,88\,;$$

$$P\left(A_{5,6}\right)=P\left(A_5 \cup A_6\right)=P\left(A_5\right)+P(A_6)-P\left(A_5\right)P(A_6)=$$

$$=0,7+0,7-0,49=0,91;$$

$$P\left(A_{4,5,6}\right)=P\left(A_4 \cap A_{5,6}\right)=P\left(A_4\right)P\left(A_{5,6}\right)=0,8\cdot 0,91\approx 0,73\,;$$

$$P\left(A_{3,4,5,6}\right)=P\left(A_3 \cup A_{4,5,6}\right)=P(A_3)+P(A_{4,5,6})-P(A_3)P(A_{4,5,6})=$$

$$=0,85+0,73-0,85\cdot 0,73=0,96;$$

$$P\left(A_{3,4,5,6,7}\right)=P\left(A_{3,4,5,6} \cap A_7\right)=P\left(A_{3,4,5,6}\right)P\left(A_7\right)=0,96\cdot 0,9=$$

$$=0,86;$$

$$P\left(A_c\right)=P\left(A_{3,4,5,6,7} \cup A_{1,2}\right)=0,86+0,88-0,86\cdot 0,88=0,98\,;$$

Вывод

За счёт параллельных связей надёжность системы выше надёжности каждого элемента.

4.5. Метод минимальных путей и сечений

Этот метод применяют, когда структуру системы нельзя свести к последовательно-параллельным цепочкам.

Введем следующие понятия:

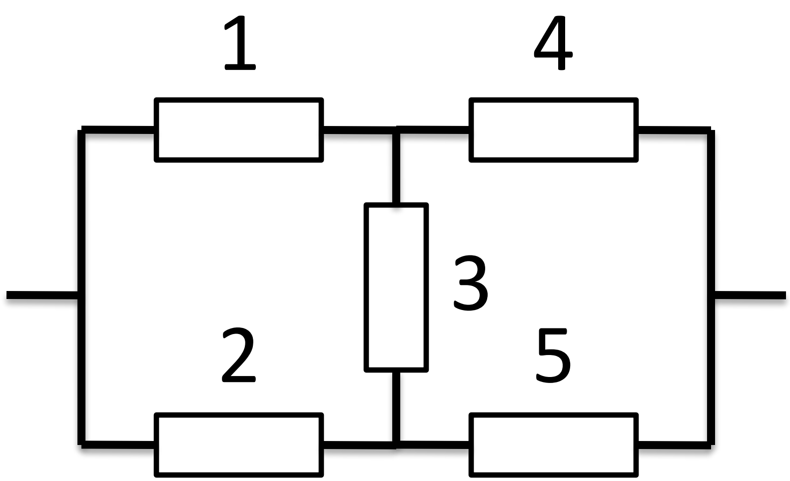
Путь – последовательность смежных элементов, соединяющая вход и выход схемы.

Сечение – совокупность элементов, удаление которых приводит к нарушению связи между входом выходом.

Минимальный путь – путь, удаление из которого хотя бы одного элемента приводит к тому, что оставшееся множество элементов не будет путём.

Минимальное сечение – сечение, удаление из которого хотя бы одного элемента приводит к тому, что оставшееся множество элементов перестаёт быть сечением.

Пример



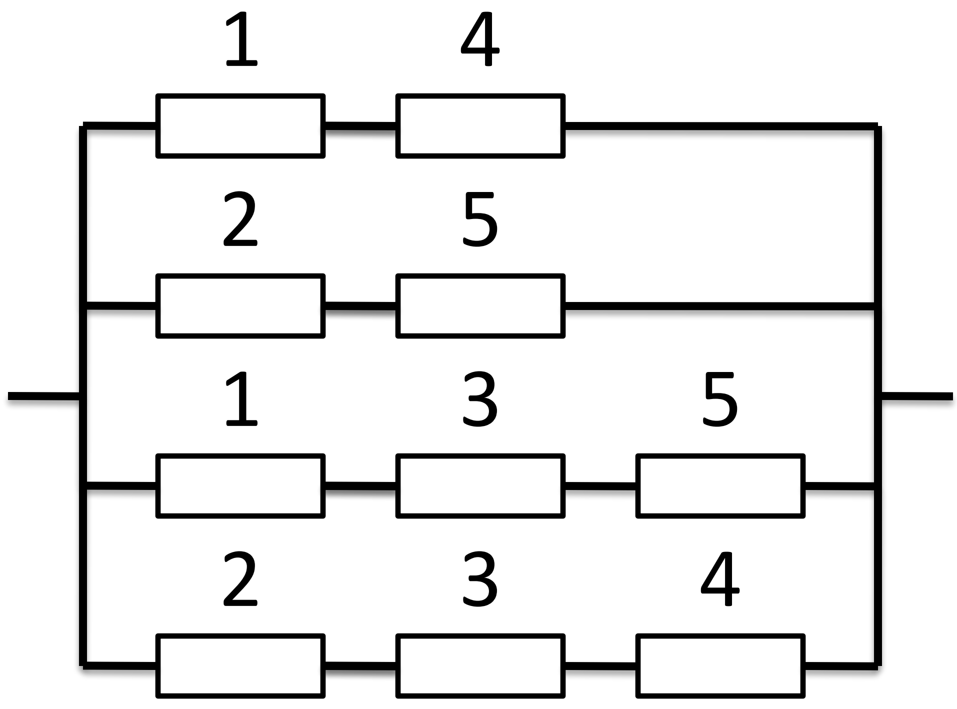
Минимальные пути:

14, 25, 135, 234

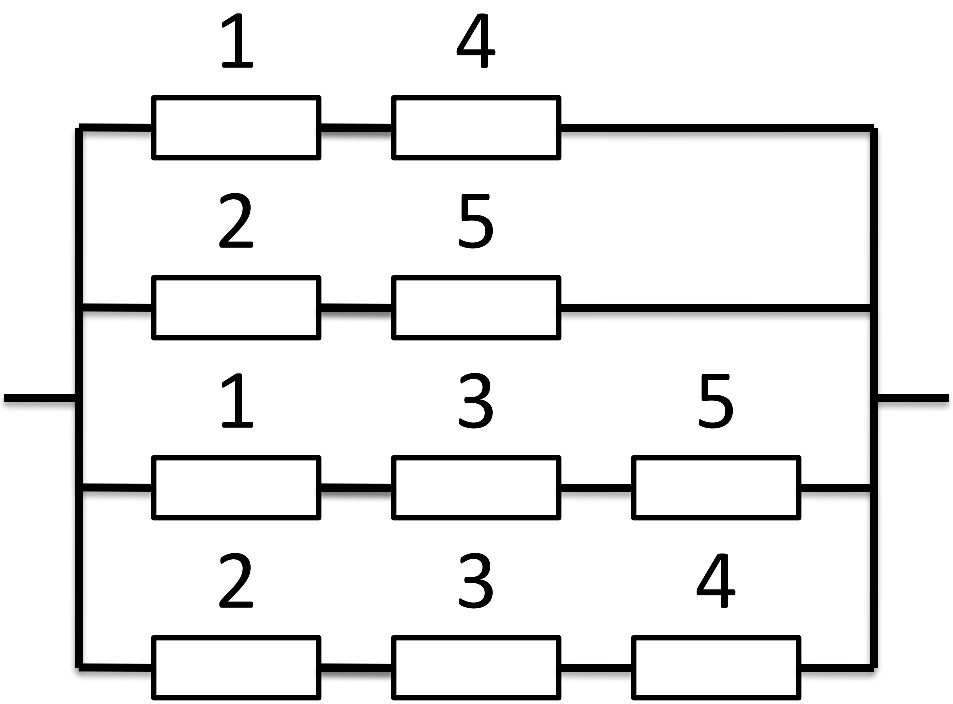
Минимальные сечения:

12, 45, 135, 234

Схема **минимальных путей** отражает работоспособность:



Пусть все элементы равнонадежны. Вероятность РСС каждого элемента равна p. Найдём вероятность РСС системы:



$$P(Ac) = p^2 + p^2 + p^3 + p^3 - p^4 - p^4 - p^4 - p^4 - p^4 - p^5 + p^5 + p^5 + p^5 + p^5 - p^5$$

$$P(Ac) = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5$$