НАДЁЖНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Автор:
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»
Александр Анатольевич Иванов

МОСКВА-2017

Российские железные дороги

ТЕМА 5
НАДЁЖНОСТЬ СИСТЕМ

5.1. ПОНЯТИЕ СИСТЕМЫ

5.1. ПОНЯТИЕ СИСТЕМЫ

Любая конструкция состоит из отдельных деталей, каждая из которых должна безотказно работать в течение определённых промежутков времени, величина которых зависит от заложенного ресурса и периодичности их контрольных проверок (освидетельствований)

Предполагая известными показатели надёжности составных частей, рассмотрим подходы к анализу надёжности конструкции в целом.

Для решения этой задачи нужно некоторое идеализированное представление конструкции как системы элементов, находящихся в определённом соотношении, т.е. нужна РАСЧЁТНАЯ СХЕМА конструкции

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Под системой понимают упорядоченное определённым образом множество элементов,
связанных между собой и
отображающих некоторое целостное единство,
т.е. для любой системы характерно наличие
интегративных качеств (свойств)
(которые не сводятся к свойствам тех или иных элементов)

Любая система имеет:

элементный состав

структурный состав

Под структурой системы понимают математическое представление связей:

а) между элементами системы (типа элемент-элемент)

б) между элементом и системой (типа элемент-система)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Под элементом системы понимают её составную часть, которая может характеризоваться собственными входными и выходными параметрами и рассматриваться как неделимая в рамках решаемой задачи.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Выходной параметр – параметр, который характеризует и обобщает результат использования объекта по назначению

НАПРИМЕР:

надрессорная балка – прочность,

часы – точность

5.2. ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЁТНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ (ВАГОНА)

При построении расчётной схемы системы нужно проанализировать её составляющие. Существует много критериев, по которым элементы включают в расчётную схему. Их выбор зависит от постановки задачи, свойств конструкции, организации эксплуатации и возможностей моделирования

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

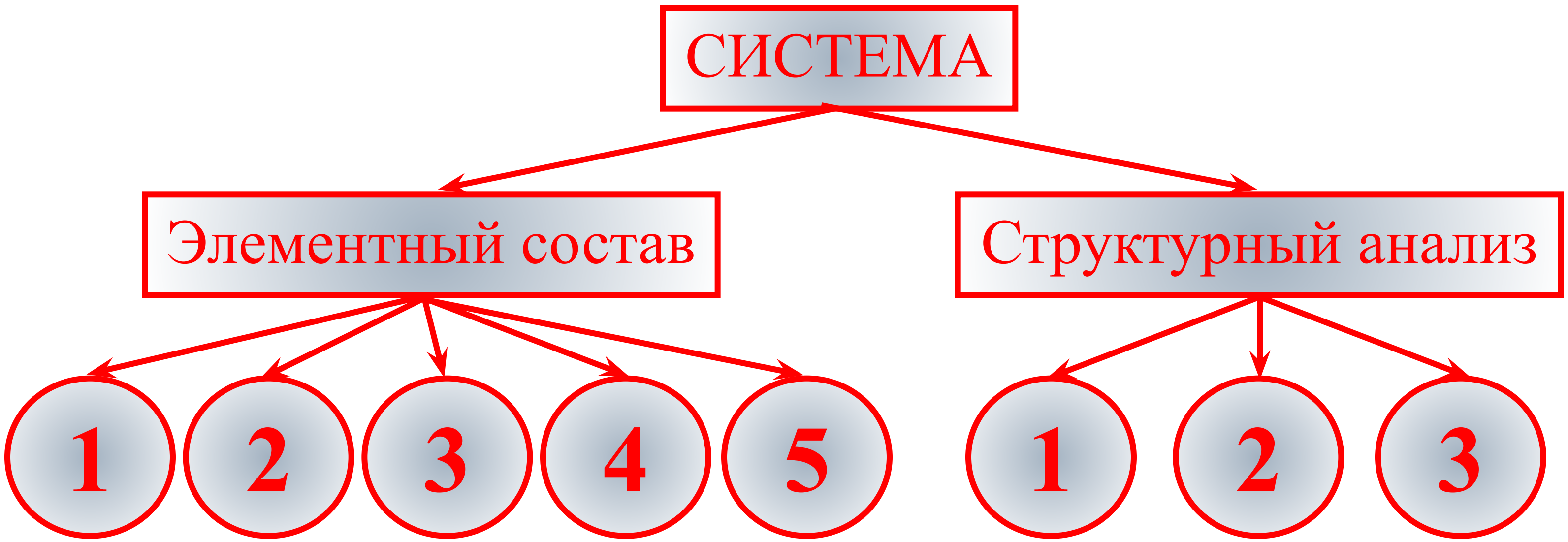
Порядок системы – количество элементов, входящих в расчётную схему надёжности системы

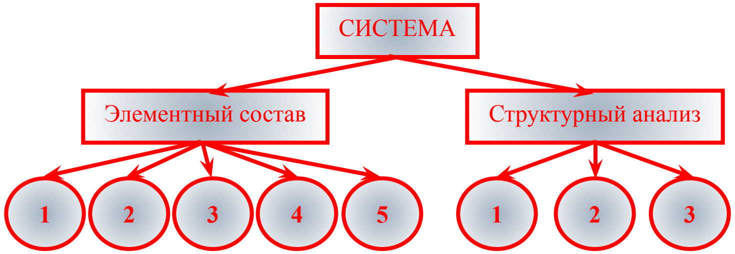
Чем больше порядок системы, тем ближе расчётная схема к реальной конструкции, однако порядок системы ограничен техническими возможностями методов анализа надёжности систем

Для построения расчётной схемы системы нужно определить:

Элементный состав *(выполнить элементный анализ)*

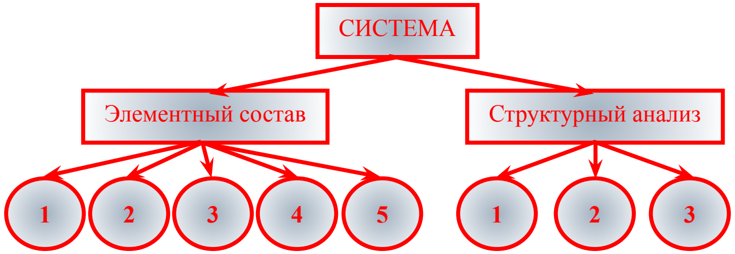
Структурный состав *(выполнить структурный анализ и определить типы связей)*





Все элементы можно разбить на пять групп:

1. Элементы, отказы которых практически не влияют на работоспособность вагона
2. Элементы, работоспособность которых практически не изменяется за рассматриваемый период времени
3. Элементы контролепригодные и ремонтопригодные, контроль технического состояния и ремонт которых возможны не прерывая графика движения поездов (за время стоянки поезда на станции, погрузках и разгрузках)

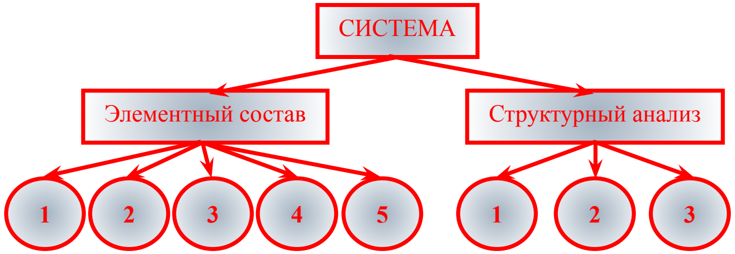


4. Элементы, отказы которых за рассматриваемый период времени могут привести к отказу вагона

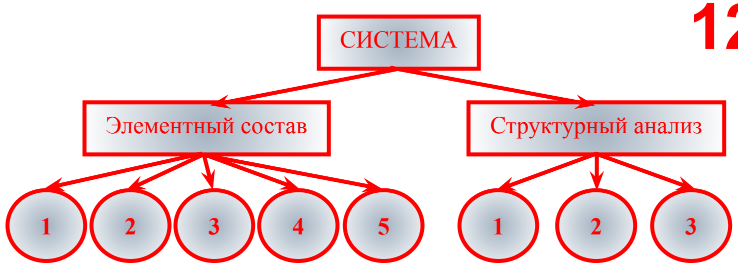
5. Элементы, которые: имеют ограниченную контролепригодность при непосредственном использовании по назначению, могут привести к рушению поезда и для ремонта которых нужны стационарные условия вагонных депо

В расчётную схему «ВАГОН» нужно включать элементы 5 и 4 групп

При анализе структуры выделяют три случая:



1. Выходной параметр элемента не участвует в формировании выходного параметра системы, кроме того изменение выходного параметра не влияет на состояние других элементов
2. Выходной параметр элемента участвует в формировании одного или нескольких выходных параметров системы
3. Выходной параметр элемента влияет на состояние других элементов. Его изменение эквивалентно изменению внешних условий работы (увеличению нагрузки, температуры и т.п.)



Каждый элемент следует отнести к одному из этих случаев.

Если в расчётную схему системы входят только элементы, попадающие только под первый случай, то имеем систему с расчленяемой структурой

(для таких систем надёжность элементов может быть заранее определена вне системы, этот случай характерен для электроники)

Если в расчётную схему системы входят элементы второй и третьей групп, то имеем систему со связанной структурой

(для таких систем анализировать надёжность элементов вне системы нужно с большой осторожностью)

Если в расчётную схему входят элементы всех трёх групп, то система имеет комбинированную структуру, которая характерна для вагона

Если надёжность всех элементов системы обеспечена, то обычно считают, что система обязательно работоспособна. Однако это верно только для расчленяемых структур.

Безотказная работа элементов является лишь необходимым, но не достаточным условием безотказной работы системы. Это связано с тем, что допуски на входные параметры элементов системы, как правило, назначаются без учёта всех возможных взаимодействий и взаимовлияний.

Незначительные отклонения свойств отдельных элементов в системах со связанной структурой ощутимо сказываются на выходных параметрах системы в целом. Малые изменения параметров элементов (в пределах допуска) могут тать такое их сочетание, которое скажется на работоспособности всей системы.

5.3. СТРУКТУРНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМ

Рассмотрим способы задания структурных функций – математических моделей систем

При выводе структурных функций будет учитываться только связи типа «ЭЛЕМЕНТ – СИСТЕМА»

Для обозначения состояния i-го элемента системы введём булевы переменные:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й элемент в работоспособном состоянии} \\ 0, & \text{если } i\text{-й элемент в неработоспособном состоянии} \end{cases}$$

Тогда состояние системы, состоящей из n элементов, можно характеризовать n-мерным вектором:

$$x=(x_1, x_2, x_3, \dots , x_n)$$

Множество всех различных состояний системы состоит из 2^n штук

В зависимости от конкретной структуры системы это множество состояний системы может быть разбито на два подмножества:

система в работоспособном состоянии
система в неработоспособном состоянии

Можно задать булеву функцию ϕ(x), которая называется структурной функцией:

$$\phi = \begin{cases} 1, & \text{если система в работоспособном состоянии} \\ 0, & \text{если система в неработоспособном состоянии} \end{cases}$$

Поскольку состояние системы полностью определяется состоянием её элементов, то можем записать:

$$\phi = \phi(x), \text{ т.е. } \phi = \phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Рассмотрим некоторые простейшие структуры систем и соответствующие булевы функции

Последовательная структура системы

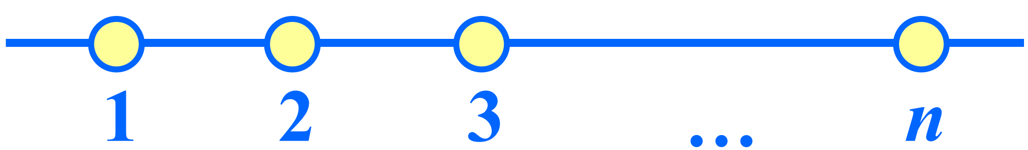
Структура, при которой отказ хотя бы одного элемента системы приводит к её отказу

Математически это представляется в виде формулы:

$$\phi(x) = \prod_{i=1}^{n} x_i \equiv \min(x_1, x_2, x_3, \dots , x_n)$$

Которую называют ***структурной функцией*** *последовательной системы*

Архитектура этой структуры:



Параллельная структура системы

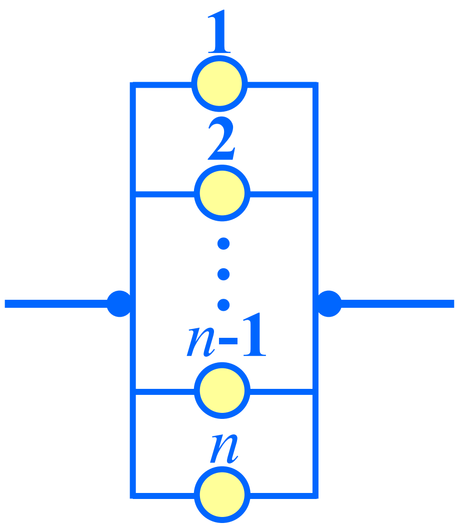
Структура, при которой система работоспособна, когда по крайней мере один элемент в работоспособном состоянии

Структурная функция:

$$\phi(x) = \coprod_{i=1}^{n} x_i \equiv \max(x_1, x_2, x_3, \ldots , x_n)$$

здесь $\coprod_{i=1}^{n} x_i \equiv 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - x_i) = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2) \times \ldots \times (1 - x_n)$

Архитектура этой структуры:



$$x_1 * x_2 = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2)$$

Структура с *m* исправными из *n* (*или структура типа «m из n»*)

Структура, при которой система работоспособна, когда по крайней мере m элементов в работоспособном состоянии

Структурная функция:

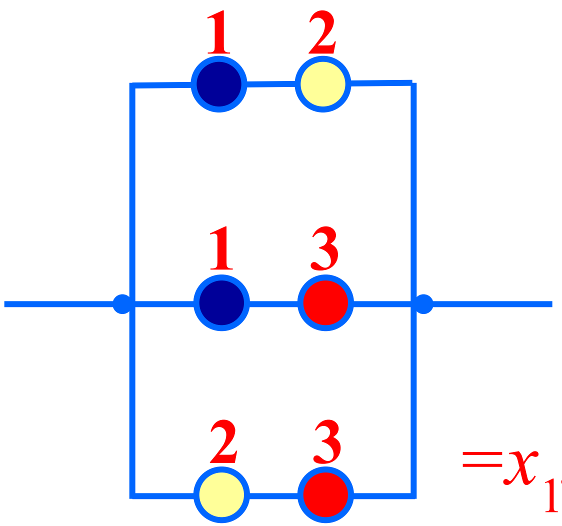
$$\phi(x) = \begin{cases} 1, \ \textbf{\textit{если}} & \sum_{i=1}^{n} x_i \geq m \\ 0, \ \textbf{\textit{если}} & \sum_{i=1}^{n} x_i < m \end{cases}$$

Последовательная и параллельная структуры являются частными случаями систем с «m из n»

Структура «n из n» – последовательная

Структура «1 из n» – параллельная

Пример структуры «2 из 3»



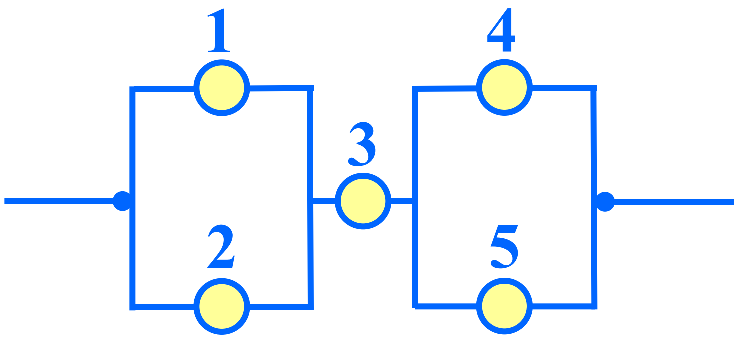
$$\phi(x) = (x_1x_2)*(x_1x_3)*(x_2x_3) =$$

$$1-(1-x_1x_2)(1-x_1x_3)(1-x_2x_3) =$$

$$= x_1x_2x_3 + x_1x_2(1-x_3) + x_1x_3(1-x_2) + x_2x_3(1-x_1)$$

Такую систему называют ***<u>последовательно-параллельной</u>***

Более часто можно встретить смешанное соединение элементов – *параллельно-последовательное*



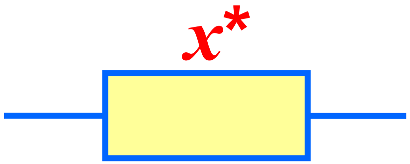
$$\phi(x)=(x_1*x_2)x_3(x_4*x_5)=$$

$$(1-(1-x_1)(1-x_2))x_3(1-(1-x_4)(1-x_5))$$

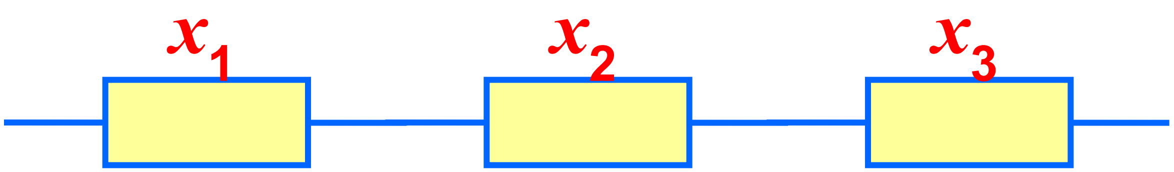
5.4. СИСТЕМЫ С ПРИВОДИМОЙ И НЕПРИВОДИМОЙ СТРУКТУРОЙ

К системам с приводимой структурой относятся системы, структура которых может быть получена при помощи следующей регулярной процедуры:

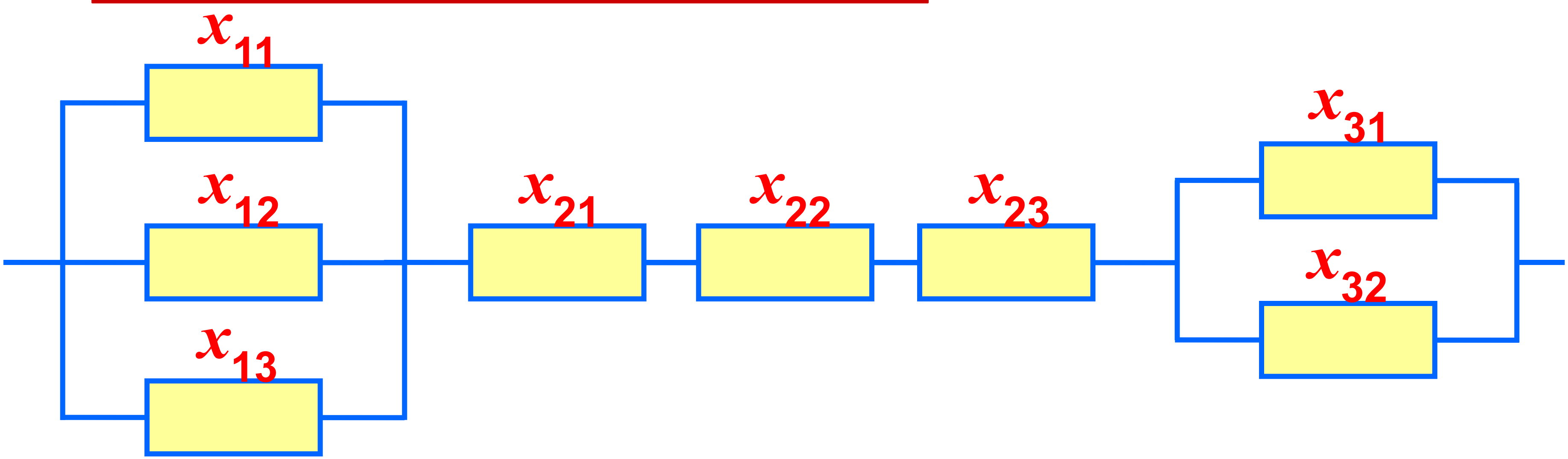
Рассматривается одиночный элемент x^*



На 1 шаге заменяем его на простейшую структуру, например, последовательную из 3-х элементов



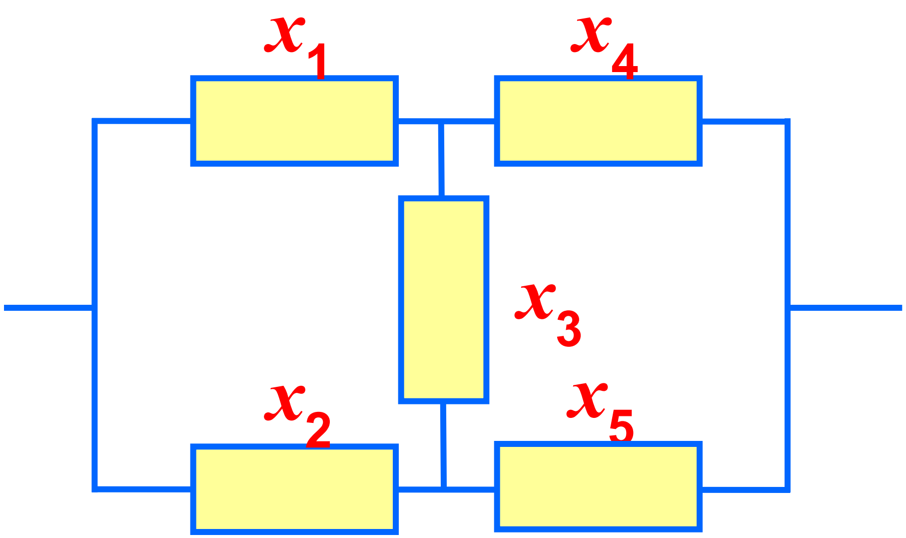
На 2 шаге каждый элемент заменяется на последовательную или параллельную структуру



Аналогично, продолжая, через несколько шагов может быть получена довольно сложная структура, которая путём соответствующих обратных трансформаций может быть сведена к одному элементу,

т.е. *простейшей двухполюсной системе*

Для таких структур просто строить структурные функции. Однако существуют структуры, когда с помощью указанной обратной процедуры невозможно их упростить, т.е. представить в виде последовательных или параллельных структур, *НАПРИМЕР*, *мостиковая схема*



Для неприводимых структур строить структурные функции сложнее, например, используя логические методы путей или сечений

ЗАМЕЧАНИЕ

Для определения надёжности системы с учётом её структуры используют:

метод структурных схем;

метод перебора состояний;

метод логических схем с применением алгебры логики (например, метод путей или метод сечений);

метод дерева событий или дерева отказов;

графовый метод.

5.5. МЕТОД СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

ЗАМЕЧАНИЕ:

Далее будем рассматривать только расчленяемые системы

Реальная система отображается в виде структурной схемы работы её элементов

Каждый элемент, включённый в расчётную схему надёжности представляется в виде блока

ДОПУЩЕНИЯ:

- элементы имеют независимые отказы
- связи элементов абсолютно надёжны, их отказы невозможны
- элементы имеют только два состояния:

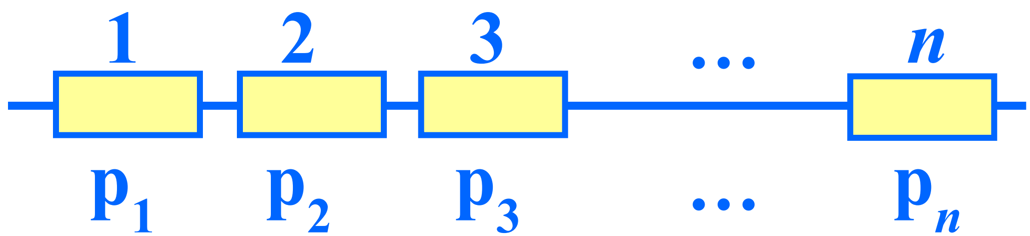
0 – неработоспособное,

1 – работоспособное)

Элементы могут иметь различные типовые соединения:

- последовательное
- параллельное
- с m исправными из n
- мостиковое
- с ненагруженным резервом
- комбинированное

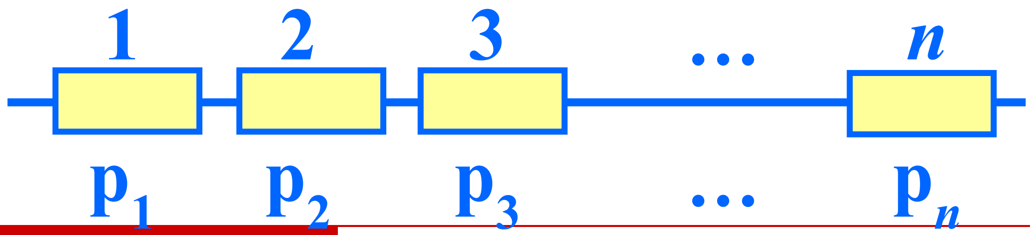
Надёжность системы с последовательным соединением элементов



p_n – ВБР n-ого элемента

ОТКАЗ СИСТЕМЫ = [отказ 1, или отказ 2, или отказ 3, …, или отказ n элемента]

НЕОТКАЗ СИСТЕМЫ = [неотказ 1, и неотказ 2, и неотказ 3, …, и неотказ n элемента]



ВБР: $p_C = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \times \ldots \times p_n = \prod_{i=1}^{n} p_i$

$$F_C = 1 - p_C = 1 - \prod_{i=1}^{n} p_i$$

ЕСЛИ ОТКАЗЫ *ВНЕЗАПНЫЕ* $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ $F_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$

$$p_C(t) = \prod_{i=1}^{n} \mathrm{EXP}(-\lambda_i t) = \mathrm{EXP}\Big(-\sum_{i=1}^{n} \lambda_i t\Big) = \mathrm{EXP}(-\lambda_\Sigma t)$$

при этом, среднее время безотказной работы:

$$\overline{T} = M\xi = \frac{1}{\lambda_\Sigma}$$

λ_Σ *– суммарная интенсивность отказов элементов системы*

ЕСЛИ все элементы одинаковые: $\lambda_i = const = \lambda$

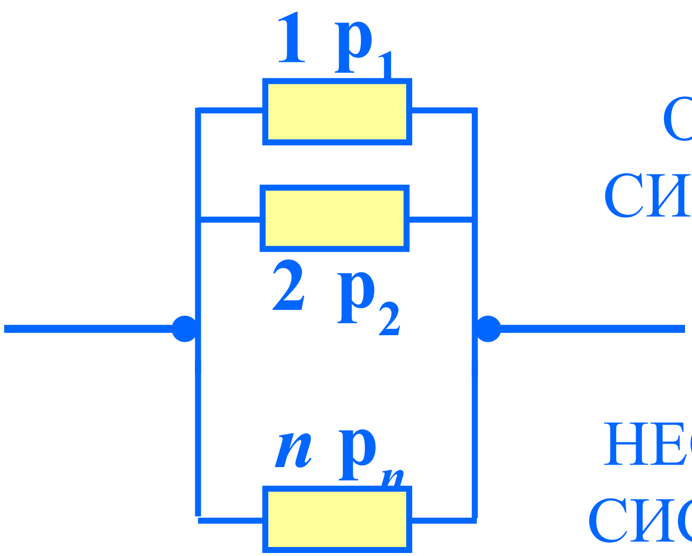
$$p_C(t) = e^{-n\lambda t} = p_i^n(t)$$

С увеличением числа элементов в системе надёжность - снижается

Например

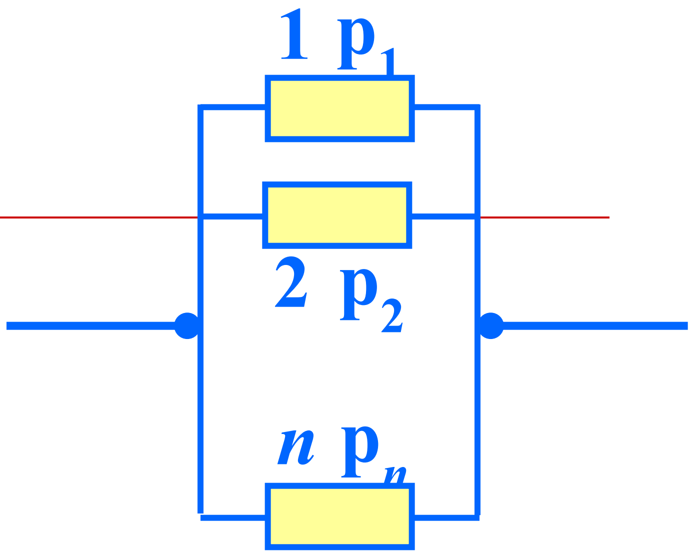
n	1	10	100
p_C(10лет)	0,999	0,912	0,398

Надёжность системы с параллельным соединением элементов



ОТКАЗ СИСТЕМЫ = [отказ 1, и отказ 2, …, и отказ *n* элемента]

НЕОТКАЗ СИСТЕМЫ = [неотказ 1, или неотказ 2, …, или неотказ *n* элемента]



ВБР: $p_C = 1 - F_C$

$$F_C = \overline{p}_1 \cdot \overline{p}_2 \cdot \overline{p}_3 \times \ldots \times \overline{p}_n = \prod_{i=1}^{n} \overline{p}_i = \prod_{i=1}^{n} (1 - p_i)$$

$$p_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - p_i)$$

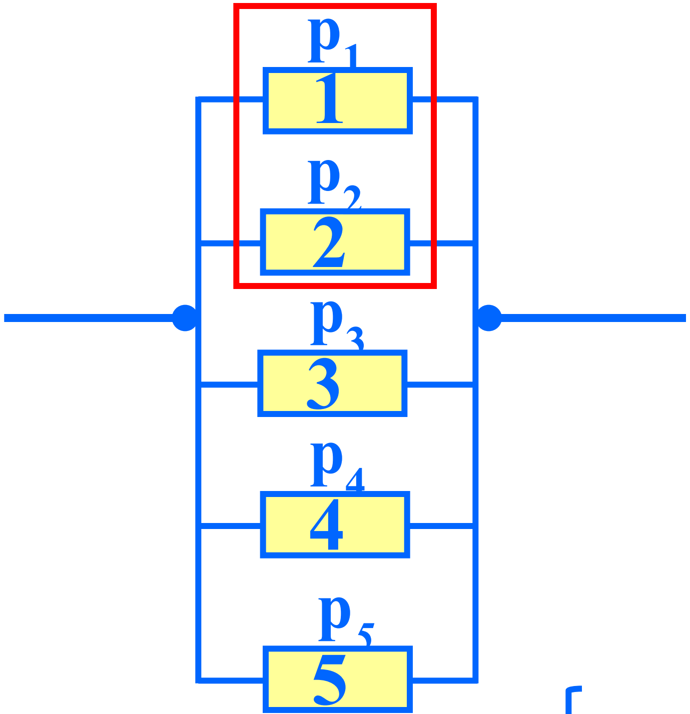
ЕСЛИ все элементы одинаковые $p_C(t) = 1 - F_i^n(t)$

С увеличением числа элементов в системе надёжность - увеличивается

Например

n	1	2	5
p_C(10лет)	0,7	0,91	0,998

Надёжность системы с m исправными элементами из n



НАПРИМЕР:

система с 2 исправными из 5 элементов

ЗАМЕЧАНИЕ:

для упрощения будем считать элементы одинаковыми, т.е.

$p_1=p_2=p_3=p_4=p_5=p$

ОТКАЗ СИСТЕМЫ = { из n элементов в работоспособном состоянии менее m элементов }

Рассмотрим надёжность структурной схемы с m исправными элементами из n с помощью метода перебора состояний

5.6. МЕТОД ПЕРЕБОРА СОСТОЯНИЙ

Технология:

1. Составить таблицу состояний элементов системы

1	1	1	1	1	p(раб.1 и раб.2 и раб.3)=ppp=p3
2	1	1	0	1	p(раб.1 и раб.2 и нераб.3)=pp(1-p)=p^2(1-p)^1
3	1	0	1	1	p(раб.1 и нераб.2 и раб.3)=p(1-p)p=p^2(1-p)^1
4	0	1	1	1	p(нераб.1 и раб.2 и раб.3)=(1-p)pp=p^2(1-p)^1
5	1	0	0	0	
6	0	1	0	0	
7	0	0	1	0	
8	0	0	0	0	

2. Определить для каждого случая состояние системы (работоспособное или неработоспособное)

3. Определить вероятность каждого состояния системы

p_C=(или1 или2 или3 или4)=p1+p2+p3+p4

4. Определить вероятность безотказной работы системы

F_C=(или5 или6 или7 или8)=p5+p6+p7+p8

$F_C+p_C=1$ p1+p2+p3+p4+p5+p6+p7+p8=1