



Основы теории надежности
Резервирование

Санкт-Петербург, 2025

Резервирование – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций.

Резерв – совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования основного элемента объекта или его самого.

Кратность резерва – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими элементов, выраженное несокращенной дробью.

Дублирование – способ резервирования с различной кратностью резерва, при котором одновременно функционируют и основные объекты и резервные.

Классификация резервированных систем производится по нескольким принципам

Таблица 1 – Классификация резервированных систем

По способу включения резервных элементов	По принципу резервирования объекта
<ul style="list-style-type: none">- постоянное резервирование, при котором резервные элементы работают в том же режиме, что и основной элемент или с меньшей нагрузкой;- включение резервных элементов путем замещения основного, вышедшего из строя;- скользящее резервирование, при котором резервные элементы заменяют любой элемент такого же типа в любой части объекта	<ul style="list-style-type: none">- общее резервирование, когда элемент или объект резервируется целиком;- раздельное резервирование, при котором резервируются элементы объекта, или группы элементов;- мажоритарное резервирование – используется в электронных объектах для ликвидации сбоев;

Резервирование

Внутренние

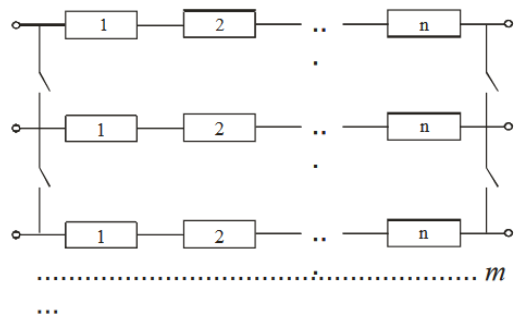


Рисунок 1 – Схема общего резервирования цепи

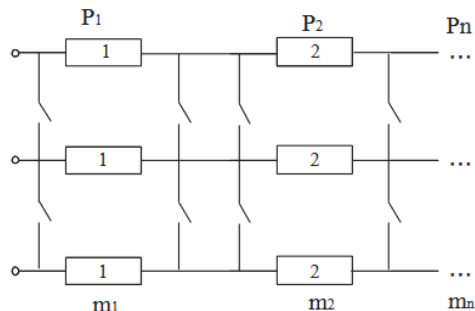


Рисунок 2 – Схема раздельного резервирования цепи



Рисунок 3 – Схема мажоритарного резервирования

Логико-вероятностный метод

Для рисунка 4 компонентами, отвечающими за безотказную работу, будут следующие:
 $p_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot p_4 \cdot x_5$, $x_1 \cdot p_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot p_5$, $p_1 \cdot x_2 \cdot p_3 \cdot x_4 \cdot p_5$, $x_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot x_5$

$$\begin{aligned} P_{\text{общ}} = & p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + \\ & + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + \\ & + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + \\ & + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + \\ & + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + \\ & + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5. \end{aligned}$$

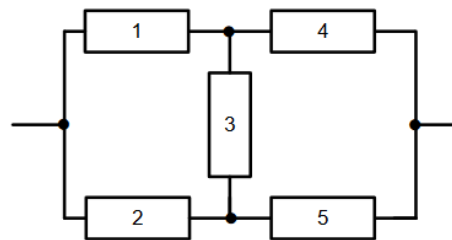


Рисунок 4 – Схема смешанного соединения элементов

Тогда для последовательного соединения из трех блоков:

$$F_{\text{л}} = a \wedge b \wedge c, F_{\text{а}} = abc \Rightarrow P_{\text{общ}} = p_1 p_2 p_3.$$

Для параллельного соединения трех блоков цепь рассуждений выглядит следующим образом:

$$F_{\text{л}} = a \vee b \vee c \vee ab \vee ac \vee bc \vee abc = a(1 \vee b \vee bc) \vee b(1 \vee a \vee ac) \vee c(1 \vee a \vee ab) = a \vee b \vee c, \\ F_{\text{а}} = (a + b + c) - (ab + ac + bc) + abc.$$

Отсюда:

$$P_{\text{общ}} = (p_1 + p_2 + p_3) - (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) + p_1 p_2 p_3.$$

Метод минимальных путей

Тогда система сохранит работоспособность при следующем условии:

$$F_{\pi} = (a \wedge d) \vee (b \wedge e) \vee (a \wedge c \wedge e) \vee (b \wedge c \wedge d)$$

и, раскрывая скобки с использованием выражений, получим:

$$F_a = ad + be - adbe + ace + bcd - acebcd - (ad + be - adbe)(ace + bcd - acebcd).$$

Или сразу можно получить:

$$P_{\text{общ}} = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)(1 - p_1 p_3 p_5)(1 - p_2 p_3 p_4).$$

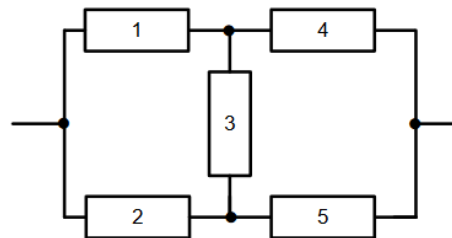


Рисунок 4 – Схема смешанного соединения элементов

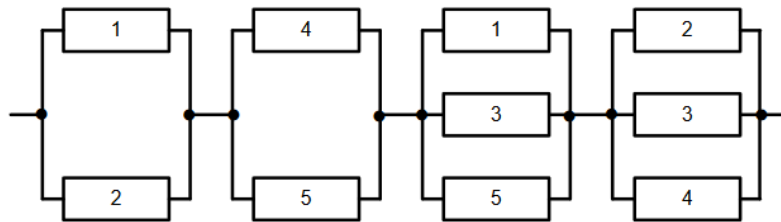
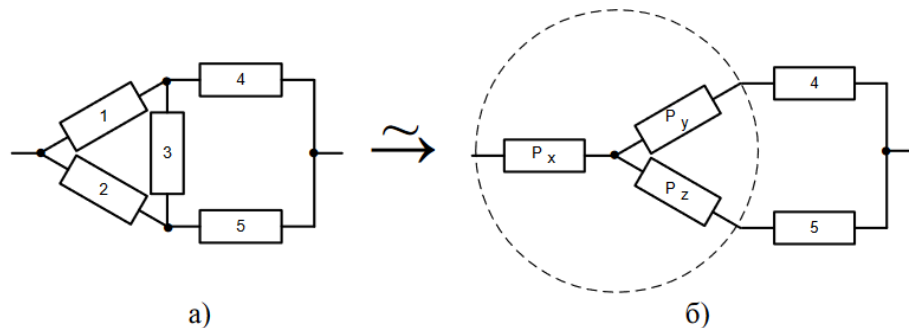


Рисунок 5 – Преобразование структуры при методе минимальных сечений



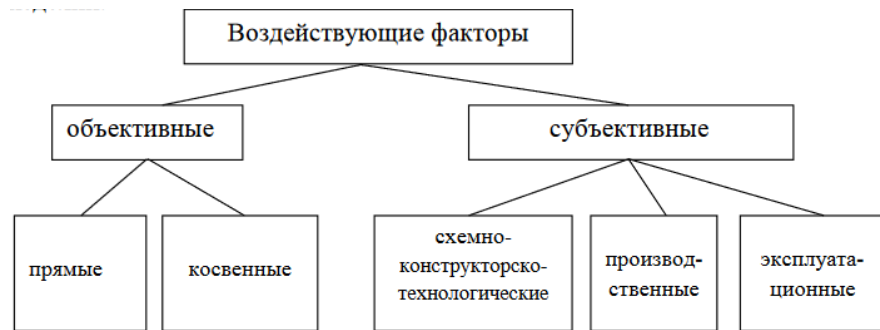
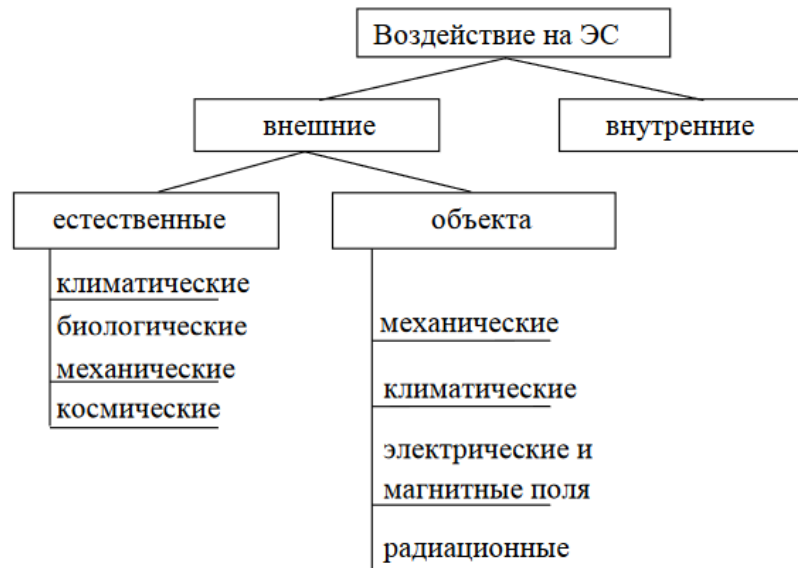
$$P_x = 1 - q_1 q_2;$$

$$P_y = 1 - q_1 q_3;$$

$$P_z = 1 - q_2 q_3$$

Рисунок 6 – Преобразование структур "треугольник" → "звезда"

Классификация воздействий и воздействующих факторов



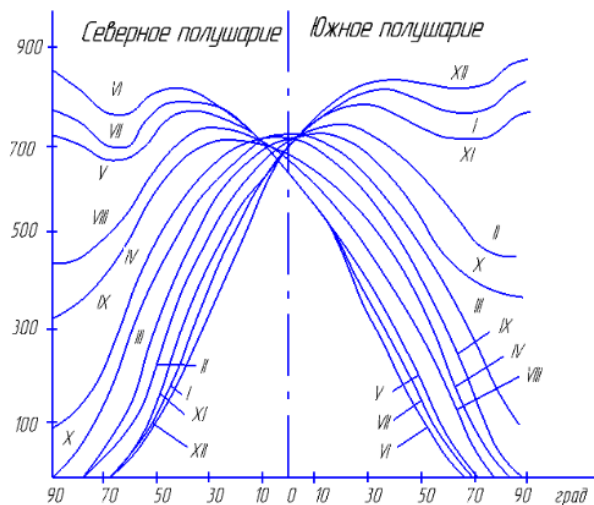


Рисунок 8 - Среднемесячные суточные значения суммарной солнечной радиации при безоблачном небе в зависимости от широты местности и времени года (I-XII - месяцы года)

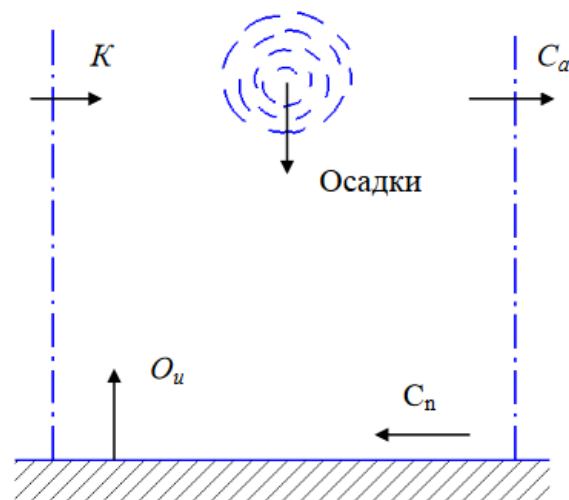


Рисунок 9 - Внутренний влагооборот на ограниченной территории

Климатические воздействия

Таблица 2 - Группы климатов, значения факторов естественных климатических воздействий и категории применения элементов ЭС

Группа климата	Минимальная температура, °C	Максимальная температура, °C	Максимальная температура при относительной влажности, равной или превышающей 95 %, °C	Максимальная абсолютная влажность воздуха, г-см ³	Максимальное изменение температуры воздуха за 8 ч, °C	Максимальная интегральная плотность потока солнечной радиации, Вт м ⁻²	Максимальная интенсивность дождя, мм мин ⁻¹	Категория применения
Теплый умеренный	-20	+35	+25	22	40	1125	3	Ограниченное
Холодный умеренный, теплый сухой	-33	+40	+27	24	40	1125	3	Общее
Все климаты Земли, за исключением экстремально холодного и экстремально теплого	-50	+40	+33	36	40	1125	5	Универсальное
Все климаты Земли	-65	+55	+33	36	40	1125	5	В любой точке земного шара

Климатические воздействия

Таблица 3 – Допустимые значения факторов естественных климатических воздействий при эксплуатации элементов ЭС

Воздействующий фактор	умеренный				холодный				тропический			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Температура воздуха, °C:												
Максимальная	+40	+40	+40	+35	+40	+40	+40	+35	+45	+45	+45	+45
Минимальная	-40	-40	-40	+1	-60	-60	-60	+1	-10	-10	-10	+1
Отн. влажность воздуха (макс. значение) %	100	100	98	80	100	100	98	80	100	100	98	98
Температура, °C	25	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35
Максимальная интегральная плотность потока солнечной радиации, Вт*м ⁻²	1125	-	-	-	1125	-	-	-	1125	-	-	-
Максимально возможная температура нагрева черной матовой поверхности, °C	+80	-	-	-	+80	-	-	-	+90	-	-	-
Колебания температуры воздуха за 8 ч, °C	+40	+30	+20	-	+40	+39	+20	-	+40	+30	+20	-
Максимальная интенсивность дождя, мм*мин ⁻¹	3	-	-	-	3	-	-	-	5	-	-	-

Биологические воздействия

Анализ биоповреждений позволяет выделить четыре их вида:

- 1) механическое разрушение при контакте организмов с ЭС;
- 2) ухудшение эксплуатационных параметров;
- 3) биохимическое разрушение;
- 4) биокоррозия.

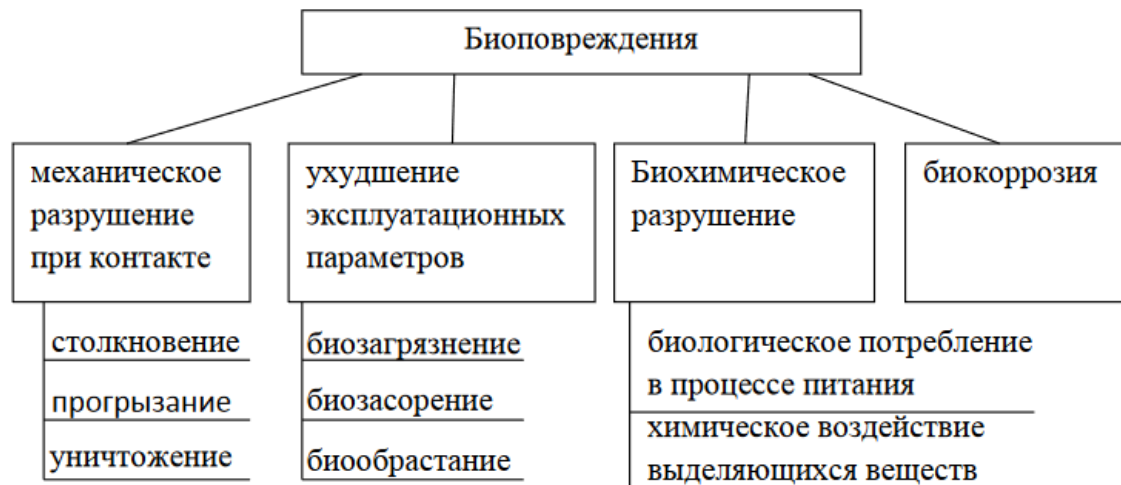


Таблица 4 - Измерение параметров атмосферы Земли с высотой

Высота, км	Давление, Па	Плотность, г/см ³	Темпе- ратура, К	Концентра- ция частиц, см ⁻³	Характе- ристика вакуума
Уровень моря	$1,33 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	293	$2,7 \cdot 10^{19}$	-
$2 \cdot 10^2$ $3 \cdot 10^2$ $5 \cdot 10^2$	$8,5 \cdot 10^{-5}$ $1 \cdot 10^{-5}$ $4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-13}$ $2,5 \cdot 10^{-14}$ $3 \cdot 10^{-16}$	1200 1500 1600	$7 \cdot 10^9$ $8 \cdot 10^8$ $2,5 \cdot 10^7$	Глубокий
$1 \cdot 10^3$ $2 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^3$ $5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-9}$ $8 \cdot 10^{-10}$ $5 \cdot 10^{-10}$ $4 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-18}$ $2 \cdot 10^{-19}$ $1 \cdot 10^{-19}$ $4 \cdot 10^{-20}$	1600 1800 2000 3000	$1,5 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^4$ $1 \cdot 10^4$ $4 \cdot 10^3$	
$10 \cdot 10^3$ $20 \cdot 10^3$ $30 \cdot 10^3$ $60 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^{-10}$ $1 \cdot 10^{-10}$ $2,5 \cdot 10^{-11}$ $1,5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-20}$ $2 \cdot 10^{-21}$ $6 \cdot 10^{-22}$ $2,5 \cdot 10^{-22}$	15000 50000 $1 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$ $1 \cdot 10^2$ 10 3-4	
					Очень глубокий
					Сверхглубокий