

## МОДУЛЬ 4

### ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

#### **Задание № 7. Количественный анализ надежности систем обеспечения безопасности**

**Цель работы** – изучить основные методы анализа надежности сложных технических систем на примере конкретной системы обеспечения безопасности.

#### ***Основные теоретические сведения***

Анализ структурной надежности технической системы, как правило, включает следующие операции:

1. Анализируются устройства и выполняемые системой и ее составными частями функции, а также взаимосвязь составных частей.
2. Формируется содержание понятия «безотказная работа» для данной конкретной системы.
3. Определяются возможные отказы составных частей и системы, их причины и возможные последствия.
4. Оценивается влияние отказов составных частей системы на ее работоспособность.
5. Система разделяется на элементы, показатели надежности которых известны (интенсивность отказов, наработка до отказа).
6. Составляется структурно-логическая схема надежности технической системы, которая является моделью ее безотказной работы.
7. Составляются расчетные зависимости для определения показателей надежности ТС с использованием данных по надежности ее элементов и с учетом структурной схемы.

*Интенсивность отказов* – показатель надежности невозстанавливаемых

объектов, равный отношению среднего числа отказавших в единицу времени (или наработки в других единицах) объектов к общему числу объектов.

*Средняя наработка до отказа* – математическое ожидание наработки от начала эксплуатации до отказа невозстанавливаемого изделия. Под наработкой понимается продолжительность или объем выполненной работы объектом.

*Гамма-процентная наработка до отказа* – наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Расчеты показателей безотказности ТС обычно проводятся в предположении, что как вся система, так и любой ее элемент могут находиться только в одном из двух возможных состояний – работоспособном и неработоспособном, а отказы элементов независимы друг от друга.

Состояние системы (работоспособное или неработоспособное) определяется состоянием элементов и их сочетанием. Поэтому теоретически возможно расчет безотказности любой ТС свести к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы.

### ***Системы с последовательным соединением элементов***

Системой с последовательным соединением элементов называется система, в которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы. Такое соединение элементов в технике встречается наиболее часто, поэтому его называют основным соединением. Считая отказы элементов независимыми, вероятность одновременной безотказной работы  $n$  элементов определяется по теореме умножения вероятностей

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)), \quad (7.1)$$

где  $p_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента системы в течение наработки  $t$  (ч);  $q_i(t)$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента системы в течение наработки  $t$  (ч). Далее аргумент  $t$  в скобках, показывающий зависимость показателей надежности от времени, опускаем для сокращения записей формул.

Если система состоит из равнонадежных элементов ( $p_i = p$ ), то получим:

$$P = p_i^n, Q = 1 - (1 - q)^n. \quad (7.2)$$

Если все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации и имеет место простейший поток отказов, то надежность элементов системы подчиняется экспоненциальному распределению:

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\Lambda t), \quad (7.3)$$

где интенсивность отказа системы равна

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const}, \quad (7.4)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказа  $i$ -го элемента системы, час<sup>-1</sup>.

### ***Системы с параллельным соединением элементов***

Системой с параллельным соединением элементов называется система, отказ которой происходит только в случае отказа всех ее элементов. Такие схемы надежности характерны для ТС, в которых элементы дублируются или резервируются, т. е. параллельное соединение используется как метод повышения надежности. Однако такие системы встречаются и самостоятельно.

Для отказа системы с параллельным соединением элементов в течение наработки  $t$  необходимо и достаточно, чтобы все ее элементы отказали в течение этой наработки. Так что вероятность безотказной работы системы равна

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (7.5)$$

Если система состоит из равнонадежных элементов ( $p_i = p$ ), то получим

$$Q = q^n, P = 1 - (1 - p)^n. \quad (7.6)$$

При экспоненциальном распределении наработки это выражение принимает вид

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n \quad (7.7)$$

### **Системы типа « $m$ из $n$ »**

Систему типа « $m$  из  $n$ » можно рассматривать как вариант системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из  $n$  элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее  $m$  элементов ( $m < n$ ) (рис. 7.1).

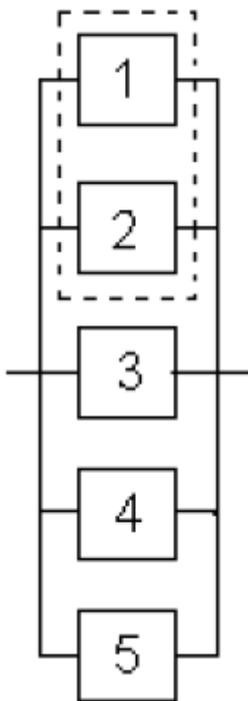


Рис. 7.1. Система «2 из 5»

Для расчета надежности систем типа « $m$  из  $n$ » при сравнительно небольшом количестве элементов можно воспользоваться методом прямого перебора. Он заключается в определении работоспособности каждого из возможных состояний системы, которые определяются различными сочетаниями работоспособных и неработоспособных состояний элементов. С учетом всех возможных состояний вероятность безотказной работы системы может быть найдена по теореме сложения вероятностей всех работоспособных сочетаний.

В таблице 7.1 приведены формулы для расчета вероятности безотказной работы систем типа « $m$  из  $n$ » с равнонадежными элементами при  $m \leq n \leq 5$  ( $p_n = p$ ). Очевидно, при  $m = 1$  система превращается в обычную систему с параллельным соединением элементов, а при  $m = n$  – с последовательным соединением.

Таблица 7.1

Формулы для расчета вероятности безотказной работы систем типа « $m$  из  $n$ » с равнонадежными элементами

Общее число элементов , n					
m	1	2	3	4	5
1	$p$	$2p - p^2$	$3p - 3p^2 + p^3$	$4p - 6p^2 + 4p^3 - p^4$	$5p - 10p^2 + 10p^3 - 5p^4 + p^5$
2	-	$p^2$	$3p^2 - 2p^3$	$6p^2 - 8p^3 + 3p^4$	$10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5$
3	-	-	$p^3$	$4p^3 - 3p^4$	$10p^3 - 15p^4 + 6p^5$
4	-	-	-	$p^4$	$5p^4 - 4p^5$
5	-	-	-	-	$p^5$

### **Мостиковые схемы**

Мостиковая структура (рис. 7.2) не сводится к параллельному или последовательному типу соединения элементов, а представляет собой соединение последовательных цепочек элементов с диагональными элементами, включенными между узлами различных параллельных ветвей.

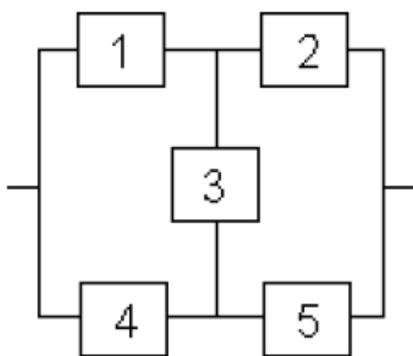


Рис. 7.2. Мостиковая схема

Работоспособность такой системы определяется не только количеством отказавших элементов, но и их положением в структурной схеме. Например, работоспособность ТС, схема которой приведена на рис. 7.2, будет утрачена при одновременном отказе элементов 1 и 4, или 2 и 5, или 1, 3 и 5 и др. В то же время отказ элементов 1 и 5, или 2 и 4, или 1, 3 и 2, или 4, 3 и 5 к отказу системы не приводит.

Вероятность безотказной работы системы, показанной на рис. 7.2, определяется как сумма вероятностей всех работоспособных состояний (метод прямого перебора):

$$\begin{aligned}
 P = & p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 p_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 + \\
 & + q_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 q_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5
 \end{aligned}$$

В случае равнонадежных элементов для этой же системы получим формулу

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2$$

***Пример количественного анализа надежности системы воздухоочистки***

Система воздухоочистки состоит, например, из некоторых 15 узлов, которые условно можно представить в виде схемы (рис. 7.3).

Из анализа данных статистических справочников или информации от производителя определим входные данные для расчета – интенсивность отказа

каждого из узлов:

— гамма-процентная наработка  $\gamma = 70 \%$ ;

— интенсивность отказов,  $\text{ч}^{-1}$ :

$$\lambda_1 = 0,05 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = 1 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_7 = \lambda_8 = \lambda_9 = \lambda_{10} = 0,5 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_{11} = \lambda_{12} = \lambda_{13} = \lambda_{14} = 0,2 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_{15} = 0,02 \cdot 10^{-6}.$$

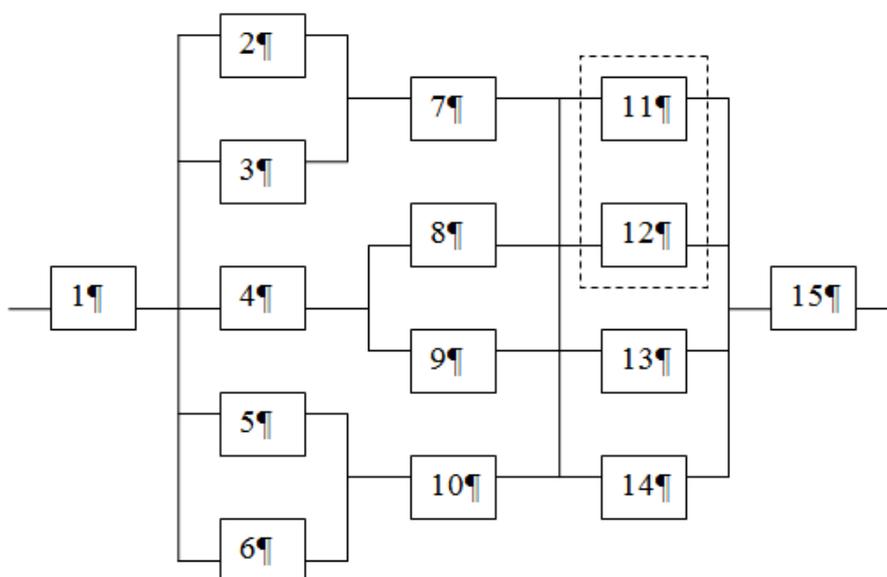


Рис. 7.3. Структурная схема соединения основных элементов системы воздухоочистки

Некоторые статистические справочные данные представлены в прил. Б.

Произведем преобразование системы в несколько этапов. Этапы 1–4 представлены на рис. 7.4.

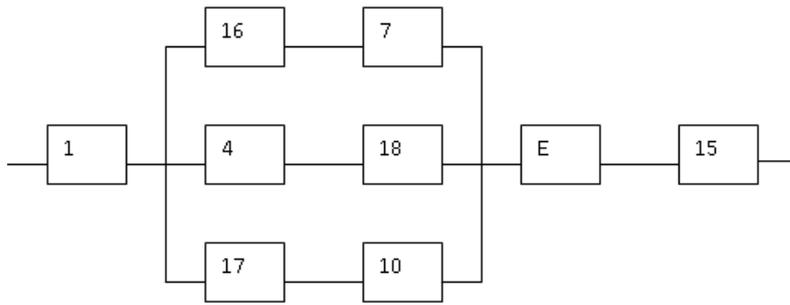


Рис. 7.4. Этапы 1–4 преобразования схемы

1. В исходной схеме (см. рис. 7.3) элементы 2 и 3 образуют параллельное соединение. Заменяем их квазиэлементом 16 с надежностью

$$p_{16} = 1 - (1 - p_2)^2.$$

2. Элементы 6 и 5 также образуют параллельное соединение, заменив которое элементом 17 и учитывая, что  $p_5 = p_6 = p_2$ , получим

$$p_{17} = 1 - (1 - p_2)^2 = p_{16}.$$

3. Элементы 8 и 9 также образуют параллельное соединение, заменив которое элементом 18 и учитывая, что  $p_8 = p_9$ , получим

$$p_{18} = 1 - (1 - p_8)^2.$$

4. Элементы 11, 12, 13 и 14 образуют соединение «2 из 4» (минимум два элемента должны обязательно быть работоспособны), которое заменяем элементом E с учетом, что  $p_{11} = p_{12} = p_{13} = p_{14}$ . Для определения вероятности безотказной работы элемента E можно воспользоваться комбинаторным методом

$$\begin{aligned} p_E &= \sum_{k=2}^4 p_k = \sum_{k=2}^4 C_4^k \cdot p_{11}^k (1 - p_{11})^{4-k} = \frac{4!}{2! \cdot 2!} p_{11}^2 (1 - p_{11})^2 + \frac{4!}{3! \cdot 1!} p_{11}^3 (1 - p_{11}) + \frac{4!}{4! \cdot 0!} p_{11}^4 = \\ &= 6p_{11}^2 (1 - p_{11})^2 + 4p_{11}^3 (1 - p_{11}) + p_{11}^4 = 6p_{11}^2 - 8p_{11}^3 + 3p_{11}^4 \end{aligned}$$

или таблицей 7.1:

$$p_E = 6p_{11}^2 - 8p_{11}^3 + 3p_{11}^4.$$

5. Элементы 16 и 7 в полученной схеме соединены последовательно. Заменяем их элементом A, для которого

$$p_A = p_{16} p_7.$$

6. Элементы 4 и 18 также соединены последовательно. Заменяем их элементом В, для которого

$$p_B = p_{18} \cdot p_4.$$

7. Элементы 10 и 17 также соединены последовательно. Заменяем их элементом С, для которого

$$p_C = p_{10} \cdot p_{17} = p_A.$$

После преобразования на этапах 5–7 полученная схема представлена на рис. 7.5.

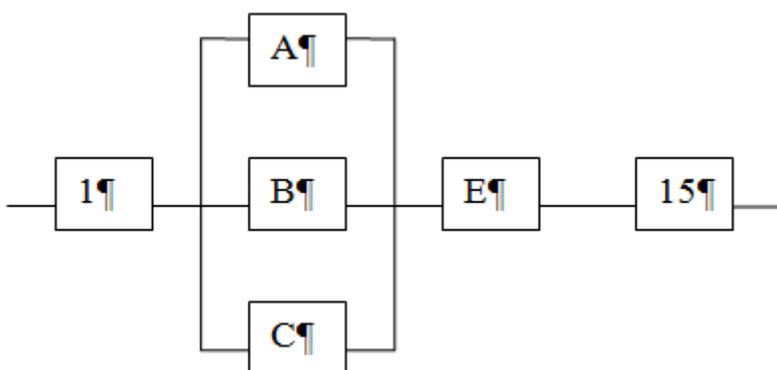


Рис. 7.5. Этапы 5–7 преобразования схемы

В новой схеме элементы А, В, С образуют параллельное соединение, следовательно, заменяем их элементом D, для которого

$$p_D = 1 - (1 - p_A)(1 - p_B)(1 - p_C).$$

Таким образом, после всех преобразований схема выглядит, как на рисунке 7.6. В преобразованной схеме элементы 1, D, E и 15 образуют последовательное соединение. Тогда вероятность безотказной работы всей системы:

$$P = p_1 \cdot p_D \cdot p_E \cdot p_{15}.$$

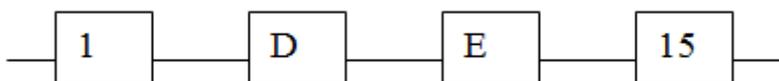


Рис. 7.6. Преобразованная схема

Так как по условию все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации, то вероятность безотказной работы элементов с 1-го по 15-й подчиняется экспоненциальному закону:

$$p_i = \exp(-\lambda_i \cdot t).$$

Произведем расчет надежности каждого элемента и системы при ее наработке в  $0,5 \cdot 10^6$  ч:

$$p_1 = e^{-0,05 \cdot 0,5} = 0,9753;$$

$$p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = e^{-1 \cdot 0,5} = 0,6065;$$

$$p_7 = p_8 = p_9 = p_{10} = e^{-0,5 \cdot 0,5} = 0,7788;$$

$$p_{11} = p_{12} = p_{13} = p_{14} = e^{-0,2 \cdot 0,5} = 0,9048;$$

$$p_{15} = e^{-0,02 \cdot 0,5} = 0,990;$$

$$p_{16} = p_{17} = 1 - (1 - 0,6065)^2 = 0,8451;$$

$$p_{18} = 1 - (1 - 0,7788)^2 = 0,9510;$$

$$p_A = p_C = 0,8451 \cdot 0,7788 = 0,6581;$$

$$p_B = 0,9510 \cdot 0,6065 = 0,5767;$$

$$p_D = 1 - (1 - 0,6581)(1 - 0,5767)(1 - 0,6581) = 0,9505;$$

$$p_E = 6 \cdot 0,9048^2 - 8 \cdot 0,9048^3 + 3 \cdot 0,9048^4 = 0,9967;$$

$$P = 0,9753 \cdot 0,9505 \cdot 0,9967 \cdot 0,990 = 0,9147.$$

Подобный расчет вероятностей безотказной работы элементов исходной и преобразованной схемы делаем также для наработки  $1 \cdot 10^6$ ,  $1,5 \cdot 10^6$ ,  $2 \cdot 10^6$ ,  $2,5 \cdot 10^6$  и  $3 \cdot 10^6$  ч. Итоговые результаты всех расчетов для наработки в диапазоне до  $3 \cdot 10^6$  ч представлены в табл. 7.2.

На рис. 7.7 представлен график зависимости вероятности безотказной работы системы (кривая  $P$ ) от времени (наработки)  $t$ , построенный по результатам табл. 7.2.

Таблица 7.2

## Расчет вероятности безотказной работы системы

Элемент	$\lambda_i, \times 10^{-6}$ ч <sup>-1</sup>	Наработка $t, \times 10^6$ ч					
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
1	0,05	0,9753	0,9512	0,9277	0,9048	0,8824	0,8607
2–6	1	0,6065	0,3678	0,2231	0,1353	0,082	0,0497
7–10	0,5	0,7788	0,6065	0,4723	0,3678	0,2865	0,2231
11–14	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488
15	0,02	0,990	0,9801	0,9704	0,9607	0,9512	0,9417
16–17	–	0,8451	0,6003	0,3964	0,2519	0,1572	0,0969
18	–	0,9510	0,8451	0,7215	0,6003	0,4909	0,3964
A, C	–	0,6581	0,3640	0,1872	0,0926	0,0450	0,0216
B	–	0,5767	0,3108	0,1609	0,0812	0,0402	0,0197
D	–	0,9505	0,7212	0,4456	0,2434	0,1255	0,0615
E	–	0,9967	0,9794	0,9438	0,8921	0,8282	0,7568
P	–	0,9147	0,6585	0,3786	0,1887	0,0872	0,0377

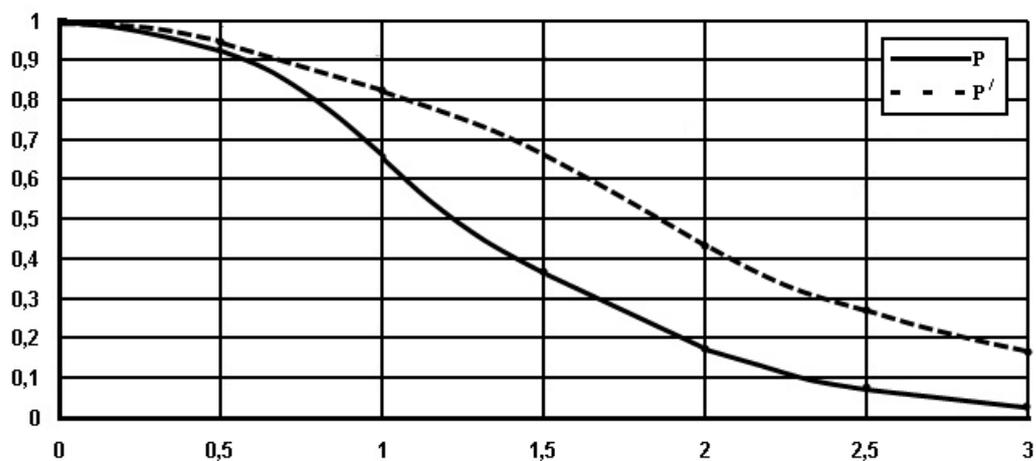


Рис. 7.7. Изменение вероятности безотказной работы исходной системы ( $P$ ), системы с повышенной надежностью ( $P'$ )

### Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить основные теоретические сведения и пример анализа надежности, представленный в настоящей работе.
2. Выбрать вариант задания к работе (табл. 7.3 и структурные схемы).
3. Номер варианта выбирается студентом из таблицы 7.4 по первым двум буквам фамилии.
4. Выполнить количественный анализ надежности выбранной системы в соответствии с изученным теоретическим материалом и приведенным выше примером расчета.
5. Составить отчет о практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).
6. Ответить на вопросы самоконтроля.

Таблица 7.3

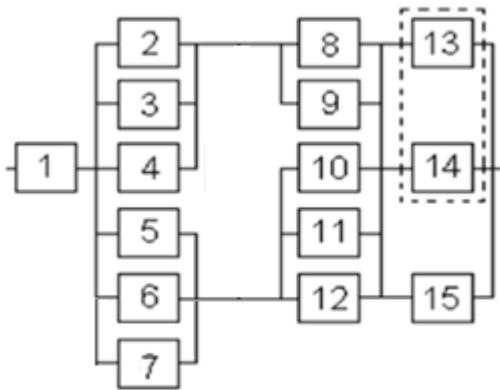
#### Варианты заданий

Вариант	Наработка $\gamma$	Интенсивность отказов элементов $\lambda_i, \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14-15
1.	75	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
2.	80	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4
3.	85	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
4.	90	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	0,7
5.	95	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7
6.	75	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
7.	80	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
8.	85	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
9.	90	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10.	95	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
11.	75	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,6	0,6
12.	80	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5
13.	85	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6

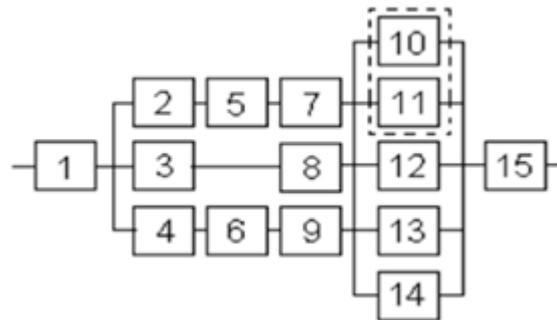
Вариант	Наработка $\gamma$	Интенсивность отказов элементов $\lambda_i, \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14-15
14.	90	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
15.	95	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4
16.	75	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6
17.	80	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5
18.	85	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
19.	90	0,7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
20.	95	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4
21.	75	0,5	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6	0,6
22.	80	0,6	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
23.	85	0,7	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
24.	90	0,8	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
25.	95	0,9	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4
26.	75	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3
27.	80	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4
28.	85	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5
29.	90	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
30.	95	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7
31.	75	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1
32.	80	0,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,2	0,2	0,2
33.	85	0,3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,3	0,3	0,3
34.	90	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4
35.	95	0,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,5	0,5	0,5
36.	75	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2
37.	80	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3
38.	85	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4
39.	90	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5
40.	95	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,6
41.	75	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1
42.	80	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
43.	85	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7

Вариант	Наработка $\gamma$	Интенсивность отказов элементов $\lambda_i, \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14-15
44.	90	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6
45.	95	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5
46.	75	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,9	0,9	0,7
47.	80	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,6
48.	85	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,5
49.	90	0,4	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	0,4
50.	95	0,3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,3

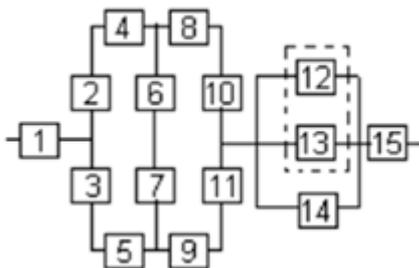
**Структурные схемы надежности**



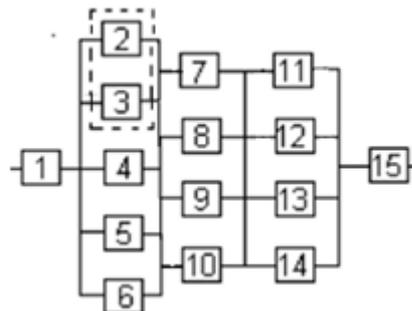
**Вариант 1-5**



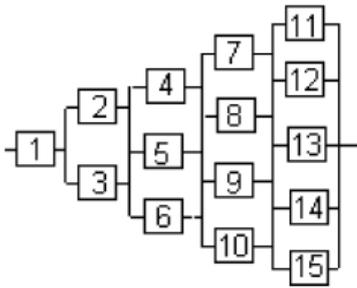
**Вариант 6-10**



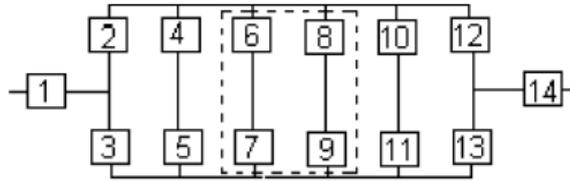
**Вариант 11-15**



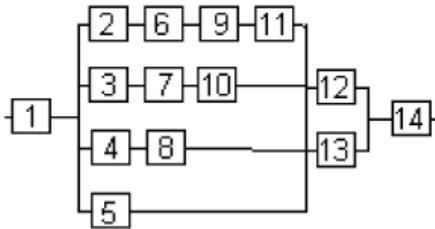
**Вариант 16-20**



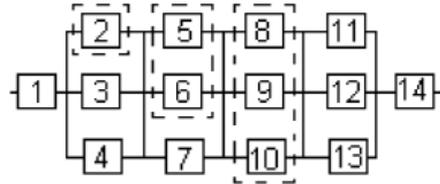
**Вариант 21-25**



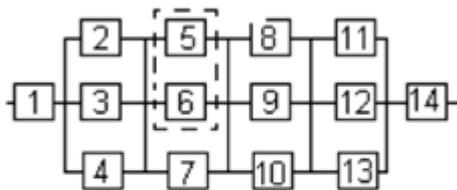
**Вариант 26-30**



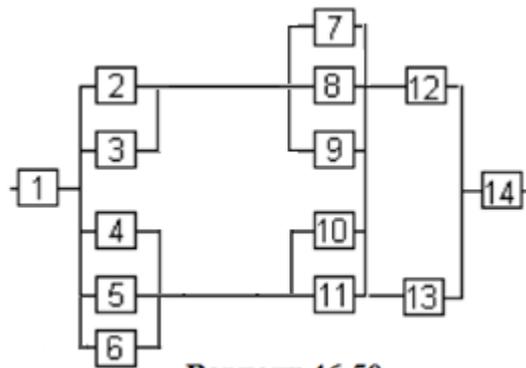
**Вариант 31-35**



**Вариант 36-40**



**Вариант 41-45**



**Вариант 46-50**

## Выбор варианта

<b>Первые две буквы фамилии</b>	<b>№ варианта</b>	<b>Первые две буквы фамилии</b>	<b>№ варианта</b>
Аа-Ак	1	Ма-Мл	21
Ал-Ая	2	Мк-Мя	22
Ба-Бк	3	На-Нл	23
Бл-Бя	4	Нм-Ня	24
Ва-Вк	5	Оа-Ок	25
Вл-Вя	6	Ол-Оя	26
Га-Гк	7	Па-Пк	27
Гл-Гя	8	Пл-Пя	28
Да-Дк	9	Ра-Рк	29
Дл-Дя	10	Рл-Ря	30
Еа-Ея	11	Са-Ск	31
Ёа-Ёя	12	Сл-Ся	32
Жа-Жя	13	Та-Тк	33
За-Зя	14	Тл-Тя	34
Иа-Ик	15	Уа-Ул	35
Ил-Ия	16	Ум-Уя	36
Ка-Кл	17	Фа-Фя	37
Км-Кя	18	Ха-Хя	38
Ла-Лк	19	Ца-Ця	39
Лл-Ля	20	Ча-Чя	40

<b>Первые две буквы фамилии</b>	<b>№ варианта</b>	<b>Первые две буквы фамилии</b>	<b>№ варианта</b>
Ша-Шл	41	Эл-Эя	46
Шм-Шя	42	Юа-Юл	47
Ща-Щл	43	Юм-Юя	48
Щм-Щя	44	Яа-Ял	49
Эа-Эк	45	Ям-Яя	50

*Вопросы самоконтроля*

1. Какие операции включает в себя анализ структурной надежности технической системы (оборудования)?
2. Что такое интенсивность отказов?
3. Что такое средняя наработка до отказа?
4. Что такое гамма-процентная наработка до отказа?
5. Как определяется надежность систем с последовательным соединением элементов?
6. Как определяется надежность систем с параллельным соединением элементов?

## Задание № 8. Выбор и обоснование методов повышения надежности систем обеспечения безопасности

**Цель работы** – изучить методы повышения надежности сложных систем и разработать мероприятия повышения надежности заданной (выбранной) системы обеспечения безопасности на основе выявления наиболее ненадежного узла.

### *Методика и пример расчета повышения наработки и надежности наиболее ненадежного узла*

На основе выполненного в практической работе № 7 количественного анализа надежности технической системы и полученных результатов расчета (табл. 7.2) рассмотрим способ повышения ее надежности путем повышения наработки наиболее ненадежного узла в 1,5 раза (табл. 8.1).

1. По графику (см. рис. 7.7, кривая  $P$ ) находим для  $\gamma = 70\%$  ( $P\gamma = 0,7$ ) – процентную наработку системы  $T_\gamma = 0,95 \cdot 10^6$  ч, для которой выполним необходимые расчеты по определению надежности каждого элемента и всей системы (колонка 9 табл. 8.1).

2. Проверочный расчет при  $T_\gamma = 0,95 \cdot 10^6$  ч показывает, что  $P\gamma = 0,6883 \approx 0,7$ .

Таблица 8.1

Расчет вероятности безотказной работы системы и выявление наиболее ненадежного узла

Элемент	$\lambda_i \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Наработка $t, \times 10^6 \text{ ч}$							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,95	1,425
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
1	0,05	0,9753	0,9512	0,9277	0,9048	0,8824	0,8607	0,9536	0,9312
2–6	1	0,6065	0,3678	0,2231	0,1353	0,082	0,0497	0,3867	0,2405

Элемент	$\lambda_i \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Наработка $t, \times 10^6 \text{ ч}$							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,95	1,425
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7–10	0,5	0,7788	0,6065	0,4723	0,3678	0,2865	0,2231	0,6218	0,4904
11–14	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,8269	0,7520
15	0,02	0,990	0,9801	0,9704	0,9607	0,9512	0,9417	0,9811	0,9719
16–17	–	0,8451	0,6003	0,3964	0,2519	0,1572	0,0969	0,6238	0,4231
18	–	0,9510	0,8451	0,7215	0,6003	0,4909	0,3964	0,8569	0,7403
A, C	–	0,6581	0,3640	0,1872	0,0926	0,0450	0,0216	0,3878	0,2074
B	–	0,5767	0,3108	0,1609	0,0812	0,0402	0,0197	0,3313	0,1781
D	–	0,9505	0,7212	0,4456	0,2434	0,1255	0,0615	0,7494	0,4840
E	–	0,9967	0,9794	0,9438	0,8921	0,8282	0,7568	0,9818	0,9503
P	–	0,9147	0,6585	0,3786	0,1887	0,0872	0,0377	0,6883	0,4162

3. По условиям задания повышенная  $\gamma$ -процентная наработка системы  $T_\gamma = 1,5 \cdot 0,95 \cdot 10^6 = 1,425 \cdot 10^6 \text{ ч}$ .

4. Расчет показывает (колонка 10 табл. 8.1), что при  $T_\gamma = 1,425 \cdot 10^6 \text{ ч}$  для элементов преобразованной схемы (см. рис. 7.4)  $p_1 = 0,9312$ ,  $p_D = 0,4840$ ,  $p_E = 0,9503$  и  $p_{15} = 0,9719$ , следовательно, из четырех последовательно соединенных элементов минимальное значение вероятности безотказной работы имеет элемент D и именно увеличение его надежности даст максимальное увеличение надежности системы в целом.

5. Для того чтобы при  $T_\gamma = 1,425 \cdot 10^6 \text{ ч}$  система в целом имела вероятность безотказной работы при  $P_\gamma = 0,7$ , необходимо, чтобы элемент D имел вероятность безотказной работы:

$$p_D = \frac{p_\gamma}{p_1 \cdot p_E \cdot p_{15}} = \frac{0,7}{0,9312 \cdot 0,9503 \cdot 0,9719} = 0,8139.$$

При таком значении элемент D останется самым ненадежным в схеме (см. рис. 7.6), что не будет противоречить исходным рассуждениям в п. 4.

Очевидно, что полученное значение  $p_D = 0,8139$  является минимальным для выполнения условия увеличения наработки не менее чем в 1,5 раза. При более высоких значениях  $p_D$  увеличение наработки и надежности системы будет еще большим.

Чтобы разобраться, почему элемент D имеет самую маленькую вероятность безотказной работы, обратимся к рис. 7.6 и табл. 4.3. Очевидно, что в элементе D самыми слабыми являются идентичные элементы A и C. В элементах A и C наименьшие значения вероятности безотказной работы принадлежат элементам 16 и 17. Элемент 16 включает в себя блоки 2 и 3, их значения  $p$  также являются минимальными по отношению к остальным блокам, а элемент 17 включает в себя блоки 5 и 6. Так как блок 4 тоже входит в элемент D и является идентичным блокам 2–3, 5–6, он тоже будет рассмотрен для определения минимальной необходимой вероятности безотказной работы элемента D.

6. Для определения минимально необходимой вероятности безотказной работы равнонадежных элементов 2–6 целесообразно использовать графоаналитический метод. Для этого по данным табл. 8.1 строим график зависимости  $p_D = f(p_2)$  (рис. 8.1). По графику при  $p_D = 0,8139$  находим  $p_2 \approx 0,52$ .

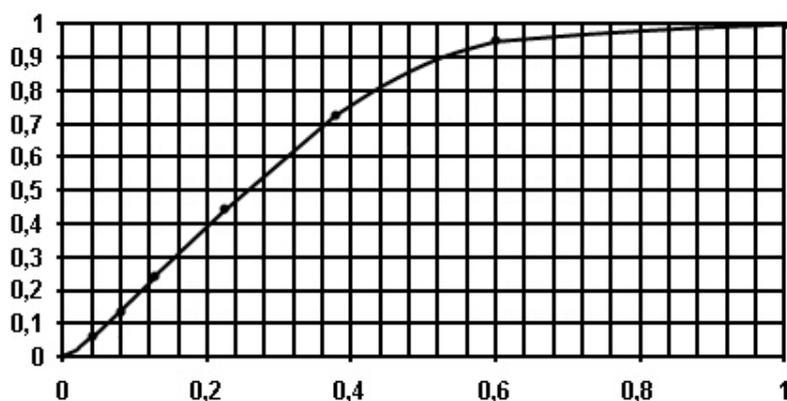


Рис. 8.1. Зависимость вероятности безотказной работы системы D от вероятности безотказной работы ее элементов

7. Так как по условиям задания все элементы работают в периоде

нормальной эксплуатации и подчиняются экспоненциальному закону, то для элементов 2–3, 5–6 при  $T_\gamma = 1,425 \cdot 10^6$  ч находим

$$\lambda'_2 = \lambda'_3 = \lambda'_4 = \lambda'_5 = \lambda'_6 = \frac{-\ln 0,52}{1,425 \cdot 10^6} = 0,458 \cdot 10^{-6}.$$

8. Таким образом, для увеличения  $\gamma$ -процентной наработки системы необходимо увеличить надежность элементов 2–3, 5–6 и снизить интенсивность их отказов с  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $0,458 \cdot 10^{-6}$  ч<sup>-1</sup>, т. е. в 1,55 раза.

9. Окончательные результаты расчетов для системы с увеличенной надежностью элементов 2–6 по методике, описанной в практической работе № 7, приведены в таблице 8.2. Там же приведены измененные значения вероятности безотказной работы системы  $D'$  и улучшенной системы в целом  $P'$  при  $T_\gamma = 1,425 \cdot 10^6$  ч, что соответствует условиям задания. График зависимости надежности улучшенной системы приведен на рисунке 7.7 (кривая  $P'$ ) в сопоставлении с исходной надежностью системы (кривая  $P$ ).

Опишем окончательные результаты исследования.

1. На рисунке 7.7 представлена зависимость вероятности безотказной работы системы (кривая  $P$ ). Из графика видно, что 70 % – наработка исходной системы составляет  $0,95 \cdot 10^6$  часов.

2. Для повышения надежности и увеличения 70 % – наработки системы в 1,5 раза (до  $1,425 \cdot 10^6$  часов) предложен способ повышения надежности элементов 2–6 и уменьшение интенсивности их отказов с  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $0,458 \cdot 10^{-6}$  ч<sup>-1</sup>, т. е. в 1,55 раза.

3. Для повышения надежности этих элементов рекомендуется использовать более прочные материалы, а также своевременно проводить осмотр данных элементов, их замену или ремонт.

Таблица 8.2.

Расчет вероятности безотказной работы системы после увеличения  
наработки

Элемент	$\lambda_i \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Наработка $t, \times 10^6 \text{ ч}$							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,95	1,425
<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,05	0,9753	0,9512	0,9277	0,9048	0,8824	0,8607	0,9536	0,9312
2 <sup>/</sup> –6 <sup>/</sup>	0,458	0,7953	0,6325	0,503	0,3921	0,3182	0,2531	0,6471	0,5206
7–10	0,5	0,7788	0,6065	0,4723	0,3678	0,2865	0,2231	0,6218	0,4904
11–14	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,8269	0,7520
15	0,02	0,990	0,9801	0,9704	0,9607	0,9512	0,9417	0,9811	0,9719
16 <sup>/</sup> –17 <sup>/</sup>	–	0,9581	0,8649	0,7529	0,6304	0,5351	0,4421	0,8754	0,7701
18	–	0,9510	0,8451	0,7215	0,6003	0,4909	0,3964	0,8569	0,7403
A <sup>/</sup> , C <sup>/</sup>	–	0,7461	0,5245	0,3555	0,2318	0,1533	0,0986	0,5443	0,3776
B <sup>/</sup>	–	0,7563	0,5345	0,3629	0,2353	0,1562	0,1003	0,5544	0,3854
D <sup>/</sup>	–	0,9843	0,8947	0,7354	0,5487	0,395	0,2661	0,9074	0,7612
E	–	0,9967	0,9794	0,9438	0,8921	0,8282	0,7568	0,9818	0,9503
P <sup>/</sup>	–	0,9472	0,8169	0,6248	0,4254	0,2745	0,1632	0,8334	0,6546

### *Алгоритм выполнения практической работы*

1. Изучить теоретические сведения по методам повышения надежности сложных систем, представленные в теоретических сведениях по модулю.

2. Изучить пример расчета, представленный в настоящей работе.

3. Для технической системы, выбранной в практической работе № 7, в соответствии с полученными в той же работе результатами выполнить расчет выявления и повышения надежности наиболее ненадежного узла.

4. Разработать дополнительные мероприятия по повышению надежности заданной (выбранной) системы обеспечения безопасности на

этапах проектирования, изготовления и эксплуатации.

5. Составить отчет о практической работе в соответствии с требованиями (прил. А)

6. Ответить на вопросы самоконтроля

*Вопросы самоконтроля*

1. Какие способы повышения надежности существуют на стадиях проектирования оборудования (систем)?

2. Какие способы повышения надежности существуют на стадиях изготовления оборудования (систем)?

3. Какие способы повышения надежности существуют на стадиях эксплуатации оборудования (систем)?

4. Как классифицируется метод резервирования?

5. Перечислить организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надежности систем.

## **Список использованных источников**

1. Ветошкин, А.Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы) : учеб. пособие / А.Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 325 с.
2. Вальдберг, А.Ю. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Защита атмосферы / А.Ю. Вальдберг, Н.Е. Николайкина. – М. : Дрофа, 2008. – 239 с.
3. Расчет пылеуловителей. В 3 ч. Ч. 1. Расчет циклонов и рукавных фильтров / А.Е. Замураев, В.Б. Пономарев. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 50 с.
4. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки : учеб. пособие. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
5. Швыдкий, В.С. Очистка газов : справочник / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М. : Теплотехник, 2005. – 640 с.
6. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения.
7. Технологии переработки твердых отходов [Электронный ресурс] : учеб.-метод. комплекс по дисциплине для студ. напр. бакалавриата 280200 «Защита окружающей среды» и спец. 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» всех форм обучения : самост. учеб. электрон. изд. / Сыкт. лесн. ин-т; сост.: О. А. Конык. – Электрон. дан. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>.
8. СП 2.1.7.1038-01. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы. Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов.
9. Надежность и безопасность технических систем: учеб. пособие / под ред. д-ра техн. наук, профессора, академика МАНЭБ А.Г. Ветошкина. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. –129 с.

10. Кравцова, М.В. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб.-метод. пособие по изучению дисциплины / М.В. Кравцова, Н.С. Подчибий. – Тольятти : ТГУ, 2010. – С. 278.

