

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Методические указания
к практическим занятиям по дисциплине**

Надежность технических систем и техногенный риск

Направление подготовки	20.03.01 Техносферная безопасность
Направленность (профиль)	Пожарная безопасность
Форма обучения	Заочная
Год начала обучения	2026
Реализуется в 5 семестре	

**Ставрополь
2026**

Оглавление

Введение.....	3
Тема 2: Сущность надежности как способности выполнять заданные функции, сохраняя свои основные характеристики в установленных пределах, при определенных условиях эксплуатации. Безопасность, долговечность и сохраняемость как основные компоненты надежности	4
Практическое занятие 1-2. Оценка единичных показателей надежности по данным об отказах элементов	4
Тема 3 Надежность восстанавливаемых элементов и изделий.....	19
Практическое занятие 3-4. Аналитическое определение количественных характеристик надежности восстанавливаемых элементов.....	19
Тема 4 Теоретические законы распределения отказов.....	34
Практическое занятие 5-6. Аналитическое определение количественных характеристик надёжности устройств при различных теоретических законах распределения времени безотказной работы....	34
Практическое занятие 7-8. Аналитическое определение количественных характеристик надёжности устройств при экспоненциальном распределении времени безотказной работы.....	43
Тема 5 Резервирование как метод повышения надежности системы	
Классификация способов резервирования и их характеристика	48
Практическое занятие 9-10. Расчет надежности технических систем с последовательным соединением элементов	48
Практическое занятие 11-12. Расчет характеристик надежности невосстанавливаемых резервированных систем.....	59
Тема 6 Основы расчета надежности технических систем по надежности их элементов.....	68
Практическое занятие 13-14. Структурно-логический анализ технических систем. Расчет мостиковых и комбинированных схем.....	68
Тема 8 Основы теории риска. Анализ риска. Нормативные значения риска. Снижение опасности риска.....	82
Практическое занятие 15-16. Расчет риска. Построение диаграммы Фармера	82
Тема 9. Классификация моделей риска на основе Марковских цепей	100
Практическое занятие 17-18 Марковские процессы в технических системах. Построение и расчет графов состояний.....	100
ПРИЛОЖЕНИЯ	113

Введение

Целью дисциплины является формирование у специалистов профессиональных компетенций, способствующих развитию его социальной мобильности, устойчивости на рынке труда в области защиты в ЧС, способности строить собственное, системное видение мира, терпимое к другим представлениям о мироздании и совместимое с ними, но имеющее преимущества при решении проблем безопасности человека в техносфере, воспитание у обучающихся социальной ответственности за результаты своей профессиональной деятельности.

Изучение дисциплины должно способствовать формированию следующих профессиональных компетенций:

ОПК-2 Способен обеспечивать безопасность человека и сохранение окружающей среды, основываясь на принципах культуры безопасности и концепции риск-ориентированного мышления.

ОПК-4 Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности

В практикуме по дисциплине «Надежность технических систем и техногенный риск» приведены основные термины и определения надежности технических систем, указаны основные опасности технических систем, обоснована актуальность проблемы безопасности с точки зрения ее социально-экономической значимости. Приведены математические формулировки, используемые при оценке и расчете основных свойств и параметров надежности технических объектов, примеры решения типовых задач и задания для работы на занятии. Рассмотрены структурные схемы надежности технических систем и их расчет, сформулированы основные методы повышения надежности и примеры использования теории надежности для оценки безопасности человеко-машинных систем.

Тема 2 Сущность надежности как способности выполнять заданные функции, сохраняя свои основные характеристики в установленных пределах, при определенных условиях эксплуатации. Безопасность, долговечность и сохраняемость как основные компоненты надежности

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1

Тема занятия: «Оценка единичных показателей надежности по данным об отказах элементов»

Цель: сформировать способность использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности

Актуальность темы. Единичные показатели надежности являются важными компонентами оценки качества элементов и систем, поэтому актуально владеть методикой их оценки.

Теоретическая часть

Показатели надежности— количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность устройства.

Критерий надежности— признак, мерило, по которому оценивается надежность различных устройств.

К наиболее применяемым критериям надежности относятся:

- вероятность безотказной работы в течение определенного времени $P(t)$;
- средняя наработка до первого отказа T_{cp} ;
- наработка на отказ t_{cp} ;
- частота отказов $f(t)$ или $a(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- параметр потока отказов $\dot{\omega}(t)$;
- функция готовности $K_z(t)$;

- коэффициент готовности K_2 .

Основные критерии надежности делят на две группы:

- критерии надежности невосстанавливаемых изделий;
- критерии надежности восстанавливаемых изделий.

Критерии надежности невосстанавливаемых изделий:

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

Основные расчетные формулы

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах $P^*(t)$

$$P^*(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (1.1)$$

где $n(t)$ – число изделий, не отказавших к моменту времени t ;

N – число изделий, поставленных на испытания.

Вероятность отказа $Q(t)$

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (1.2)$$

Вероятность отказа по статистическим данным об отказах $Q^*(t)$

$$Q^*(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (1.3)$$

где $N - n(t)$ – число изделий, отказавших к моменту времени t .

Частота отказов по статистическим данным об отказах $f^*(t)$

$$f^*(t) = \frac{\Delta n(t)}{N^* \Delta t}, \quad (1.4)$$

где $n(t)$ – число отказавших изделий на участке времени $(t, t + \Delta t)$.

Интенсивность отказов по статистическим данным об отказах $\lambda^*(t)$

$$\lambda^*(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t * N_{ср}(t)}, \quad (1.5)$$

где $\Delta n(t)$ – число отказавших изделий на участке времени $(t, t + \Delta t)$;

$N_{cp}(t)$ – среднее число изделий, исправно работающих элементов в интервале времени $(t, t+\Delta t)$.

$$N_{cp}(t) = \frac{N_{i-1} + N_i}{2}, \quad (1.6)$$

где N_{i-1} – число исправно работающих объектов в начале интервала времени Δt ;

N_i – число исправно работающих объектов в конце интервала времени Δt .

Средняя наработка до первого отказа по статистическим данным об отказах m_t^*

$$m_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.7)$$

где t_i – время безотказной работы i -го элемента;

N – общее число элементов, поставленных на испытания.

$$m_t^* \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m n_i * t_{cc_i}, \quad (1.8)$$

где n_i - количество вышедших из строя изделий в i -ом интервале времени;

$$t_{cc} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}, \quad (1.9)$$

$$m = \frac{t_k}{t}, \quad (1.10)$$

$$t = t_{i+1} - t_i, \quad (1.11)$$

где t_{i-1} – время начала i -го интервала;

t_i – время конца i -го интервала;

t_k – время, в течение которого вышли из строя все изделия;

t – интервал времени.

Дисперсия времени безотказной работы изделия по статистическим данным D_t^*

$$D_t^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - m_t^*)^2. \quad (1.12)$$

Примеры решения задач

Задача 1. На испытание было поставлено 1000 однотипных ламп. За первые 3000 час отказало 80 ламп, а за интервал времени 3000 – 4000 час отказало еще 50 ламп.

Определить статистическую оценку частоты $f^*(t)$ и интенсивности отказов ламп $\lambda^*(t)$ в промежутке времени 3000 – 4000 час.

Решение:

Исходные данные: $N = 1000$; $t = 3000$ час; $\Delta t = 1000$ час; $\Delta n(t) = 50$; $n(t) = 920$.

$$f^*(3500) = \frac{\Delta n(t)}{N * \Delta t} = \frac{50}{1000 * 1000} = 5 * 10^{-5} \text{ 1/час,}$$

$$\lambda^*(3500) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t * N_{cp}(t)} = \frac{50}{1000 * (920 + 870) / 2} = 5,6 * 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

Результаты расчета: $f^*(3500) = 5 * 10^{-5}$ 1/час; $\lambda^*(3500) = 5,6 * 10^{-5}$ 1/час.

Задача 2. За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зафиксировано 8 отказов. Время восстановления составило: $t_1 = 12$ мин; $t_2 = 23$ мин; $t_3 = 15$ мин; $t_4 = 9$ мин; $t_5 = 17$ мин; $t_6 = 28$ мин; $t_7 = 25$ мин; $t_8 = 31$ мин.

Рассчитать среднее время восстановления аппаратуры $m_{tв}^*$.

Решение:

Исходные данные: $N = 8$; $t_1 = 12$ мин; $t_2 = 23$ мин; $t_3 = 15$ мин; $t_4 = 9$ мин; $t_5 = 17$ мин; $t_6 = 28$ мин; $t_7 = 25$ мин; $t_8 = 31$ мин.

$$m_{tв}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{12 + 23 + 15 + 9 + 17 + 28 + 25 + 31}{8} = \frac{160}{8} = 20 \text{ мин.}$$

Результаты расчета: $m_{tв}^* = 20$ мин.

Задача 3. В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в таблицу 1.1. Определить m_t^* .

Таблица 1.1

t_i , час	n_i	t_i , час	n_i	t_i , час	n_i
0 – 5	1	30 – 35	4	60 – 65	3
5 – 10	5	35 – 40	3	95 – 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:

Исходные данные: $N = 45$; $tcp_1 = 2,5$; $tcp_2 = 7,5$; $tcp_3 = 12,5$; $tcp_4 = 17,5$; $tcp_5 = 22,5$; $tcp_6 = 27,5$; $tcp_7 = 32,5$; $tcp_8 = 37,5$; $tcp_9 = 42,5$; $tcp_{10} = 47,5$; $tcp_{11} = 52,5$; $tcp_{12} = 57,5$; $tcp_{13} = 62,5$; $tcp_{14} = 67,5$; $tcp_{15} = 72,5$; $tcp_{16} = 77,5$; $tcp_{17} = 27,5$; $m = 16$.

$$m_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m n_i * tcp_i = \frac{1 * 2,5 + 5 * 7,5 + 8 * 12,5 + 2 * 17,5 + 5 * 22,5 + 6 * 27,5 + 4 * 32,5 + 3 * 37,5 + 0 * 42,5 + 1 * 47,5 + 0 * 52,5 + 0 * 57,5 + 3 * 62,5 + 3 * 67,5 + 3 * 72,5 + 1 * 77,5}{45} = 31,7.$$

Результаты расчета: $m_t^* = 31,7$ час.

Задача 4. Число изделий, поставленных на испытание, $N = 1000$ изделий. Испытания проводятся в течение 100 часов. Каждые сто часов определялось количество отказов изделий. Результаты испытаний представлены в таблице 1.2. Найти статистическую оценку распределения вероятностей отказа $Q(t)$ и безотказной работы $R(t)$ во времени. Найти изменение плотности вероятности отказов $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ по времени. Результаты расчета отразить на графиках.

Решение

1. Определяем количество работоспособных изделий на конец каждого периода по формуле

$$N(t) = N - n(t)$$

2. Определяем статистическую оценку вероятности безотказной работы на конец каждого периода по формуле

$$\tilde{R}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = \frac{N(t)}{N}.$$

3. Определяем количество отказавших деталей нарастающим итогом на конец каждого периода по формуле

$$n(t_{i+1}) = n(t) + \Delta n(t)$$

4. Определяем статистическую оценку вероятности отказа на конец каждого периода по формуле

$$\tilde{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}.$$

5. Определяем статистическую оценку плотности вероятности отказов по формуле

$$\tilde{f}(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \Delta t}.$$

6. Определяем значение интенсивности отказов по формуле

$$\tilde{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t)}{(N - n(t)) \Delta t}$$

7. Результаты расчета для удобства сводим в таблицу 1.2

8. По данным расчета строим графики зависимости расчетных величин по времени (рисунки 1.1, 1.2, 1.3)

Таблица 1.2 – Результаты расчета статистических оценок показателей безотказности

Времен ной интерва	Количе ство отказов за данный	Количество работоспосо бных изделий на конец	Количе ство отказав ших изделий	Вероятн ость безотказ ной	Вероятн ость отказа Q(t)	Плотнос ть вероятн ости	Интенсив ность отказов $\lambda(t)$, $\cdot 10^{-2}$
--------------------------	---	--	---	------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	--

л Δt , час	интерва л $\Delta n(t)$	периода $N(t)$	на конец периода	работы $R(t)$		отказов $f(t)$, $\cdot 10^{-2}$	
		1000					
0 – 100	50	950	50	0,95	0,05	0,0005	0,0005263 2
100 – 200	40	910	90	0,91	0,09	0,0004	0,0004395 6
200 – 300	20	890	110	0,89	0,11	0,0002	0,0002247 2
300 – 400	20	870	130	0,87	0,13	0,0002	0,0002298 9
400 – 500	10	860	140	0,86	0,14	0,0001	0,0001162 8
500 – 600	70	790	210	0,79	0,21	0,0007	0,0008860 8
600 – 700	110	680	320	0,68	0,32	0,0011	0,0016176 5
700 – 800	280	400	600	0,4	0,6	0,0028	0,007
800 – 900	250	150	850	0,15	0,85	0,0025	0,0166666 7
900 – 1000	150	0	1000	0	1	0,0015	

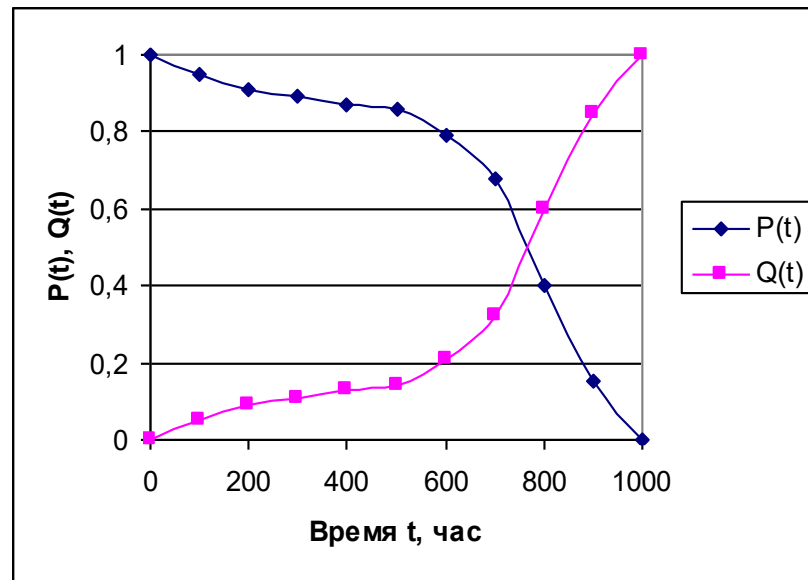


Рисунок 1.1 – График зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от времени

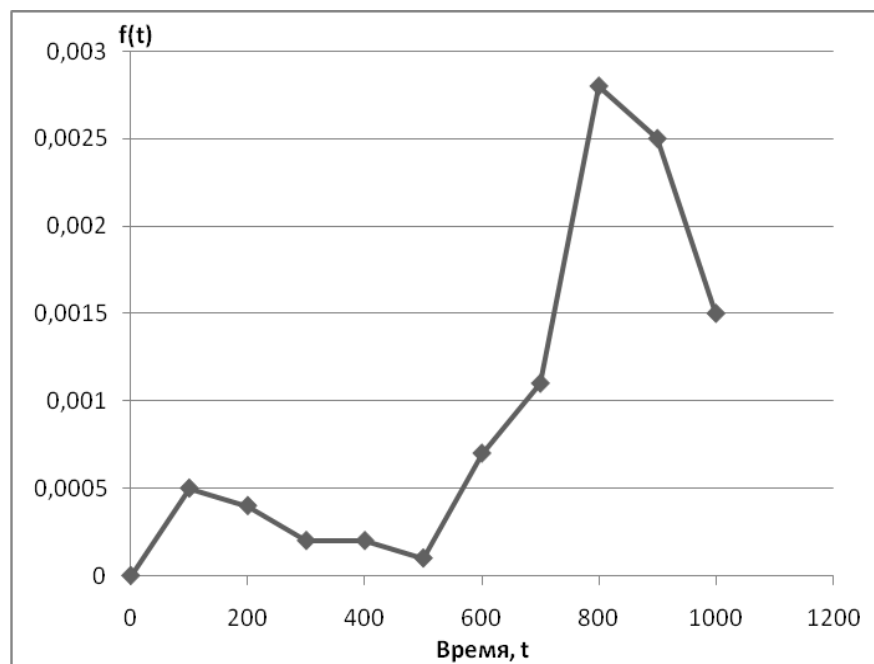


Рисунок 1.2 – График зависимости плотности распределения отказов во времени

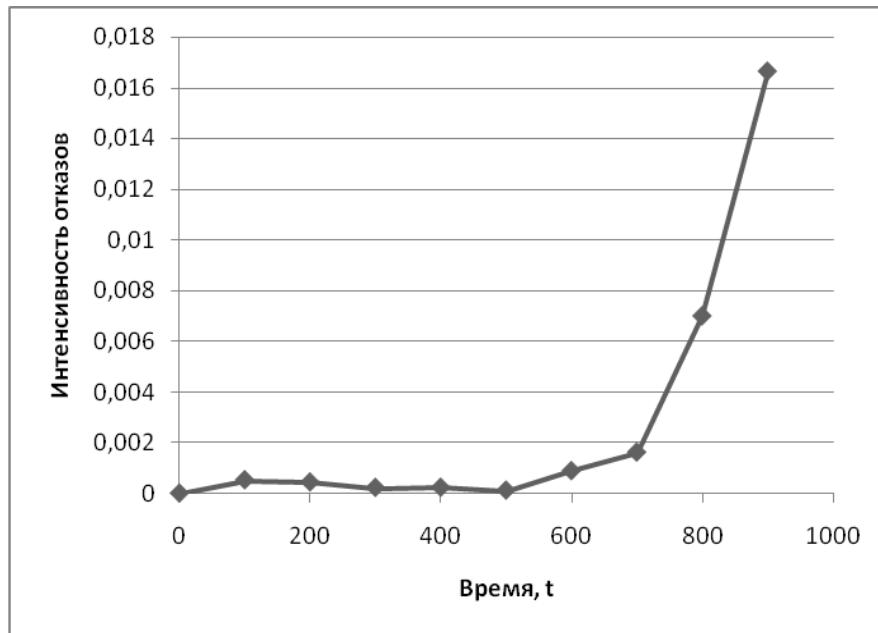


Рисунок 1.3 – График зависимости интенсивности отказов от времени

Вопросы и задания

Вопросы.

1. Перечислите основные компоненты надежности.
2. Укажите показатели надежности невосстанавливаемых изделий.
3. Какие зависимости используют для оценки надежности невосстанавливаемых элементов?
4. Какие значения могут принимать вероятности безотказной работы и вероятности отказа элементов
5. Дайте определение частоты и интенсивности отказов.
6. Что такое средняя наработка до отказа?
7. Как определяются статистические оценки вероятности безотказной работы и вероятности отказа?
8. Как определяется плотность распределения наработки?
9. Что такое интенсивность отказов?
10. Приведите кривую зависимости интенсивности отказов от времени.

11. Дайте определение средней наработки до отказа и средней наработки до первого отказа.

12. Какие существуют показатели безотказности элементов технических систем?

13. Чем отличается вероятностная оценка показателей от статистической?

14. Какие элементы называют невосстанавливаемыми?

Задания.

Задание №1. На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За 3000 час отказало 80 ламп.

Определить вероятность безотказной работы $P^*(t)$ и вероятность отказа $Q^*(t)$ в течение $t = 3000$ час.

Задача №2. На испытание поставлено 1000 однотипных изделий. За 4000 час отказало 50 изделий. За интервал времени 4000 – 4200 час отказало ещё 30 изделий.

Произвести статистическую оценку частоты $f^*(4100)$ и интенсивности отказов изделий $\lambda^*(4100)$.

Задание №3. На испытание поставлено $N = 400$ изделий. За время $t = 3000$ час отказало 200 изделий. За интервал времени $\Delta t = 100$ час отказало 100 изделий.

Определить вероятность безотказной работы $P^*(3000)$, $P^*(3100)$, частоту отказов $f^*(3050)$ и интенсивность отказов $\lambda^*(3050)$.

Задание №4. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 час отказало 50 изделий.

Определить вероятность безотказной работы $P^*(4000)$ и вероятность отказа $Q^*(4000)$.

Задание №5. В течение 1000 час из 10 приборов отказало 2. За интервал времени 1000 – 1100 час отказал еще один прибор.

Произвести статистическую оценку частоты $f^*(1000)$ и интенсивности отказов изделий $\lambda^*(1000)$.

Задание №6. На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За первые 3000 час отказало 80 ламп. За интервал времени 3000 – 4000 час отказало еще 50 ламп.

Определить вероятность безотказной работы $P^*(4000)$ и вероятность отказа $Q^*(4000)$.

Задание №7. На испытание поставлено 1000 изделий. За время $t = 1300$ час вышло из строя 288 штук изделий. За последующий интервал времени 1300 – 1400 час вышло из строя еще 13 изделий.

Определить: вероятность безотказной работы $P^*(t)$ при $t = 1300$ час и $t = 1400$ час; частоту $f^*(t)$ и интенсивность отказов изделий $\lambda^*(t)$ при $t = 1300$ час.

Задание №8. На испытание поставлено 45 изделий. За время $t = 60$ час вышло из строя 35 штук изделий. За последующий интервал времени 60 – 65 час вышло из строя еще 3 изделия.

Определить: вероятность безотказной работы $P^*(t)$ при $t = 60$ час и $t = 65$ час; частоту $f^*(t)$ и интенсивность отказов изделий $\lambda^*(t)$ при $t = 60$ час.

Задание №9. На испытание поставлено 6 однотипных изделий. Получены следующие значения времени безотказной работы t_{ii} -го изделия: $t_1 = 280$ час; $t_2 = 350$ час; $t_3 = 400$ час; $t_4 = 320$ час; $t_5 = 380$ час; $t_6 = 330$ час.

Рассчитать статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия m_t^* .

Задание №10. В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования, которые прошли предварительную 80-часовую приработку, получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в таблицу 1.3.

Рассчитать статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия m_t^* .

Таблица 1.3

t_i , час	n_i	t_i , час	n_i	t_i , час	n_i
0 – 10	19	30 – 40	3	60 – 70	1
10 – 20	13	40 – 50	0		
20 – 30	8	50 – 60	1		

Задание №11. На испытание поставлено 8 однотипных изделий. Получены следующие значения времени безотказной работы t_{ii} -го изделия: $t_1 = 560$ час; $t_2 = 700$ час; $t_3 = 800$ час; $t_4 = 650$ час; $t_5 = 580$ час; $t_6 = 760$ час; $t_7 = 920$ час; $t_8 = 850$ час.

Рассчитать статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия m_t^* .

Задание №12. За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зарегистрировано 6 отказов. Время восстановления составило: $t_1 = 15$ мин; $t_2 = 20$ мин; $t_3 = 10$ мин; $t_4 = 28$ мин; $t_5 = 22$ мин; $t_6 = 30$ мин.

Определить среднее время восстановления аппаратуры $m_{тв}^*$.

Задание №13. На испытание поставлено 1000 изделий. За время $t = 11000$ час вышло из строя 410 изделий. За последующий интервал времени 11000 – 12000 час вышло из строя еще 40 изделий.

Определить: вероятность безотказной работы $P^*(t)$ при $t = 11000$ час и $t = 12000$ час; частоту $f^*(t)$; интенсивность отказов изделий $\lambda^*(t)$ при $t = 11000$ час.

Задание №14. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 часов работы отказало 50 изделий. Определить статистические оценки вероятности безотказной работы и вероятности отказа за время работы 4000 часов.

Задание №15. На испытание поставлено 10 однотипных изделий. Получены следующие значения времени безотказной работы: $t_1 = 580$ час; $t_2 = 720$ час; $t_3 = 860$ час; $t_4 = 550$ час; $t_5 = 780$ час; $t_6 = 830$ час; $t_7 = 910$ час; $t_8 = 850$ час; $t_9 = 840$ час; $t_{10} = 750$ час. Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Задание №16. На испытание поставлено 600 изделий. За время 1200 часов вышло из строя 125 штук изделий. За последующий интервал времени 1200 – 1250 часов вышло из строя еще 13 изделий. Необходимо определить статистическую оценку вероятности безотказной работы и вероятности отказа за время работы $t_1 = 1200$ час и $t_2 = 1250$ час; оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между $t_1 = 1200$ час и $t_2 = 1250$ час.

Задание №17. В течение 500 часов работы из 20 буровых насосов отказало 2. За интервал времени 500 – 520 часов отказал еще один буровой насос. Дать оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между $t_1 = 500$ час и $t_2 = 520$ час.

Задание №18. Число изделий, поставленных на испытание, $N = 1000$ изделий. Испытания проводятся в течение 100 часов. Каждые сто часов определялось количество отказов изделий. Результаты испытаний представлены в таблице 1.4.

1. Найти статистическую оценку распределения вероятностей отказа $Q(t)$ и безотказной работы $R(t)$ во времени.
2. Найти изменение плотности вероятности отказов $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ по времени.
3. Результаты расчета отразить на графиках.

Таблица 1.4 – Исходные данные для расчетов

Номер варианта	Общее кол-во изделий	Количество отказавших изделий за интервал времени t_i , шт.									
		0 – 100	100 – 200	200 – 300	300 – 400	400 – 500	500 – 600	600 – 700	700 – 800	800 – 900	900 – 1000
1	1000	30	170	50	20	30	20	280	200	70	130
2	2500	80	320	300	20	80	600	600	110	210	200
3	3000	100	500	200	10	90	100	100	600	100	500
4	5100	150	950	200	100	50	190	1360	1100	250	750
5	1150	50	180	60	20	35	25	330	220	50	170
6	7300	1240	370	140	230	140	2060	1450	450	1000	1240
7	8300	250	1410	420	170	250	160	2320	1660	420	1240
8	300	9	51	15	6	9	6	84	60	15	45
9	1000	30	170	50	30	20	20	180	300	140	60
10	300	9	51	15	9	6	6	54	90	42	18
11	700	22	117	38	20	12	13	143	195	98	42
12	6700	200	1140	260	270	140	134	1206	2010	890	450
13	3700	110	630	190	110	70	80	660	1110	520	220
14	1200	40	200	60	36	24	24	216	360	168	72
15	1800	60	300	90	60	30	36	324	540	252	108
16	1300	34	224	66	30	14	16	276	380	186	74
17	13300	390	2270	510	530	270	258	2402	4010	1770	890
18	7300	210	1250	370	210	130	150	1310	2210	1030	430
19	2300	70	390	110	62	38	38	422	710	326	134
20	3500	110	590	170	110	50	62	638	1070	494	206

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. Надежность технических систем и техногенный риск: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / С.П. Тимошенко, Б.М. Симонов, В.Н. Горошко. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 502 с.

2. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб.пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. – 313 с. : ил. ; 21. – (Учебники для вузов.

Специальная литература). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 307-310. – ISBN 978-5-8114-1268-6

3. В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2012. – 368 с.

4 Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. – Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. – 275 с. : ил. – Библиогр.: с. 264-273

5. <http://www.complexdoc.ru/> - База нормативных документов и технических стандартов.

Тема 3. Надежность восстанавливаемых элементов и изделий

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2

Тема занятия: «Аналитическое определение количественных характеристик надежности восстанавливаемых элементов»

Цель: сформировать способность использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности; изучить количественные показатели оценки надежности восстанавливаемых систем; получить аналитические выражения для показателей надежности восстанавливаемой системы и рассчитать их.

Актуальность темы. Аналитическая оценка количественных показателей надежности является важным элементом общей оценки качества элементов и систем, поэтому актуально владеть методикой их оценки.

Теоретическая часть

Методические рекомендации к практическому занятию

Под **надежностью изделия** (элемента узла, устройства, системы) понимается свойство последнего сохранять свое качество при определенных условиях эксплуатации в течение заданного промежутка времени, то есть надежность – качество развернутое во времени. Количественно надежность характеризуется рядом интегральных, интервальных и точечных показателей.

Невосстанавливаемые изделия – изделия, поведение которых существенно лишь до первого отказа – характеризуются следующими количественными показателями надежности: интенсивностью отказов $\lambda(t)$; частотой отказов $f(t)$; вероятностью безотказной работы $P(t)$; вероятностью отказа $Q(t)$; наработкой до отказа T_0 .

Восстанавливаемые изделия – изделия, эксплуатация которых допускает их многократный ремонт. Они характеризуются следующими количественными показателями надежности:

- параметром потока отказов $\omega(t)$;
- параметром потока восстановлений $\mu(t)$;
- функцией готовности $K_r(t)$;
- коэффициентом готовности K_r ;
- средним временем работы между двумя отказами t_{cp} ;
- средним временем восстановления t_{θ} .

Если в процессе функционирования **невосстанавливаемого изделия возможен ремонт отдельных его элементов при сохранении работоспособности** изделия в целом за счет резерва, то такие изделия характеризуются следующими количественными показателями надежности:

- вероятностью безотказной работы $P(t)$;
- вероятностью отказа $Q(t)$;
- наработкой до отказа T_0 ;
- параметрами потока отказов элементов изделия $\omega(t)$ и потока восстановлений элементов изделия $\mu(t)$.

Для восстанавливаемых систем можно применять различные показатели безотказности. При задании потока отказов как дискретного случайного процесса $\eta(t)$ – числа отказов на интервале $(0, t)$ показателем безотказности является **параметр потока отказов $\omega^*(t)$** , определяемый соотношением:

$$\omega^*(t) = \frac{n_o(\Delta t)}{N * \Delta t}, \quad (2.1)$$

$n_o(\Delta t)$ – число отказов системы на малом отрезке времени;

N – число испытываемых элементов;

Δt – интервал времени.

Ожидаемое число отказов:

$$W(t) = \int_0^N \omega^*(t) * \Delta t, \quad (2.2)$$

где $\omega^*(t)$ – параметр потока отказов к началу интервала;

Δt – интервал времени, ч.

Условная интенсивность отказов ($\lambda^*(t)$) – доля исправных элементов в совокупности, которая как ожидается, откажет в единицу времени в момент t .

$$\lambda^*(t) = \frac{n_o(\Delta t)}{\Delta t * Nc(t)}, \quad (2.3)$$

где $Nc(t)$ – среднее число отказов в интервале;

Δt – интервал времени, ч.

Показатели ремонтпригодности.

Среднее время восстановления – это математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа

Среднее время восстановления:

$$T = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \tau_j, \quad (2.4)$$

где M – количество однотипных объектов, для каждого из которых определено общее время восстановления;

τ_j – время, затраченное на восстановление (обнаружение, поиск причины и устранение отказа), в часах.

Интенсивность восстановления – это отношение условной плотности вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенной для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено, к продолжительности этого интервала.

$$\mu(t) = \frac{N\beta(\Delta t)}{N_{н.ср} * \Delta t}, \quad (2.5)$$

где $N\beta(\Delta t)$ – количество восстановлений однотипных объектов за интервал Δt ;

$N_{н.ср}$ – среднее количество объектов, находящихся в невосстановленном состоянии на интервале Δt .

Плотность потока ремонтов (безусловная интенсивность ремонтов) ($\nu(t)$) – вероятность того, что элемент ремонтируется в единицу времени в момент t .

$$\nu(t) = \frac{Np(\Delta t)}{N * \Delta t}, \quad (2.6)$$

где $Np(\Delta t)$ – число ремонтируемых объектов к началу интервала;

Δt – интервал времени, ч;

N – число объектов, поставленных на испытание.

Ожидаемое число ремонтов

$$V(t) = \int_0^N \nu(t) * \Delta t \quad (2.7)$$

Условная интенсивность ремонтов – доля исправных элементов в совокупности, которая как ожидается, будет ремонтироваться в единицу времени в момент t .

$$\eta^*(t) = \frac{Np(\Delta t)}{N_c * \Delta t}, \quad (2.8)$$

Параметр потока отказов и наработка на отказ характеризуют надежность ремонтируемого изделия и не учитывают времени, потребного на его восстановление. Следовательно, они не характеризуют готовности изделия к выполнению своих функций в нужное время. Для этой цели вводятся такие критерии, как коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя.

Коэффициентом готовности называется вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Согласно данному определению,

$$K_z = \frac{tp}{tp + tn}, \quad (2.9)$$

где t_p – суммарное время работоспособного состояния объекта;

t_n – суммарное время, в течение которого объект не использовался по назначению. Значения времени t_p и t_n вычисляются по формулам:

$$tp = \sum_{i=1}^n t_{pi}, \quad tn = \sum_{i=1}^n t_{ni}, \quad (2.10)$$

где t_{pi} – время работы изделия между $(i-1)$ -м и i -м отказом;

t_{ni} – время вынужденного простоя после i -го отказа; n – число отказов (ремонт) изделия.

Выражение (2.9) является статистическим определением коэффициента готовности. Для перехода к вероятностной трактовке величины t_p и t_n заменяются математическими ожиданиями времени между соседними отказами и времени восстановления соответственно. Тогда

$$K_z = \frac{T}{T + T_v}, \quad (2.11)$$

где T – наработка на отказ;

T_v – среднее время восстановления.

Коэффициентом вынужденного простоя называется отношение времени вынужденного простоя к сумме времени исправной работы и времени вынужденных простоев изделия, взятых за один и тот же календарный срок. Согласно определению,

$$K_n = \frac{t_v}{t_{cc} + t_v}, \quad (2.11)$$

Коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя связаны между собой зависимостью

$$K_n = 1 - K_z, \quad (2.12)$$

При анализе надежности восстанавливаемых систем обычно коэффициент готовности вычисляют по формуле

$$K_z = \frac{T_{cc}}{T_{cc} + T_v}, \quad (2.13)$$

Формула (2.13) верна только в том случае, если поток отказов простейший, и тогда $t_{cp} = T$.

Коэффициент технического использования определяют по формуле:

Примеры решения задач

Задача 1. На промышленные испытания поставлено 3 буровых насоса. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 144 отказа, у второго – 160 отказов, у третьего – 157 отказов. Суммарная наработка на отказ для первого насоса составила 3250 часов, для второго – 3600 часов, для третьего – 2800 часов. Определить среднюю наработку до отказа и средний ресурс бурового насоса.

Решение:

Средняя наработка до отказа определяется по формуле:

$$\hat{T}_{cp} = \frac{t_{\text{сум}}}{n(t_{\text{сум}})} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N m_i} = \frac{3250 + 3600 + 2800}{144 + 160 + 157} = 20,9 \text{ час.}$$

Средний ресурс определяем по формуле

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N} = \frac{3250 + 3600 + 2800}{3} = 3216,7 \text{ час.}$$

Таким образом, средняя наработка до отказа равна $\hat{T}_{cp} = 20,9 \text{ час}$. Данный показатель является:

- показателем безотказности;
- единичным, так как характеризует только одно свойств – безотказность;
- экспериментальным, так как определяется по результатам испытаний;
- смешанным, так как характеризует надежность небольшой партии изделий.

Средний ресурс равен , $T_0 = 3216,7 \text{ час}$, данный показатель является:

- показателем долговечности;

- единичным, так как характеризует только одно свойств – долговечность;
- экспериментальным, так как определяется по результатам испытаний;
- смешанным, так как характеризует надежность небольшой партии изделий.

Задача 2. На испытания поставлено 500 изделий. Результаты определения ресурса представлены в таблице 2.1. По данным испытаний определить гамма - процентный ресурс для $\gamma = 95 \%$, 90% и 80% .

Таблица 2.1 – Результаты испытаний изделий

№№	Интервал времени, час	Количество отказавших изделий n(t)
1	0 – 100	24
2	100 – 200	29
3	200 – 300	35
4	300 – 400	15
5	400 – 500	16
6	500 – 600	20
7	600 – 700	35
8	700 – 800	57
9	800 – 900	133
10	900 – 1000	136

Решение:

Для определения гамма-процентного ресурса необходимо найти значение наработки, вероятность которой равна 0,95; 0,90; 0,80, согласно формуле

$$P(T_{p\gamma}) = \frac{\gamma}{100} \quad (2.12)$$

Определим количество работоспособных изделий и вероятность безотказной работы на конец каждого временного интервала, результаты расчета сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета

№№	Интервал времени, час	Количество отказавших изделий n(t)	Количество работоспособных	Вероятность безотказной работы P(t)
----	-----------------------	------------------------------------	----------------------------	-------------------------------------

			изделия N(t) к концу периода	
1	0 – 100	24	476	0,952
2	100 – 200	29	447	0,894
3	200 – 300	35	412	0,824
4	300 – 400	15	397	0,794
5	400 – 500	16	381	0,762
6	500 – 600	20	361	0,722
7	600 – 700	35	326	0,652
8	700 – 800	57	269	0,538
9	800 – 900	133	136	0,272
10	900 – 1000	136	0	0

По представленному расчету вероятностям 0,95; 0,90 и 0,80 соответствуют значения наработки равные 100, 200 и 400 часов соответственно (выделены в таблице 2.2).

Таким образом, гамма-процентные ресурсы равны $T_{p95} = 100$ часов; $T_{p90} = 200$ часов; $T_{p95} = 400$ часов, показатели являются:

- показателем долговечности;
- единичным, так как характеризует только одно свойств – долговечность;
- экспериментальным, так как определяется по результатам испытаний;
- смешанным, так как характеризует надежность небольшой партии изделий.

Задача 3. В результате наблюдений за работой буровой лебедки получены следующие данные о времени, затраченном на смену тормозных лент, в часах: 2,5; 1,8; 1,8; 2,6; 0,8; 1,2; 0,6; 2,0; 1,6; 3.2. Всего 10 наблюдений. Определить среднее время восстановления буровой лебедки.

Решение:

Статистическая оценка среднего времени восстановления вычисляется по формуле (2.4)

$$T_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^m T_{\text{в}i}}{m} = \frac{2,5+1,8+1,8+2,6+0,8+1,2+0,6+2,0+1,6+3,2}{10} = \frac{18,1}{10} = 1,81$$

часа,

Таким образом, среднее время восстановления равно $T_{\text{в}} = 1,81$ часа, показатель является:

- показателем ремонтпригодности;
- единичным, так как характеризует только одно свойств – ремонтпригодность;
- эксплуатационным, так как определяется по результатам эксплуатации;
- единичным, так как характеризует надежность одного изделия.

Задача 4. Определить коэффициент готовности системы при среднем времени восстановления равном 2 часа и средней наработке на отказ равной 100 часов.

Решение:

Среднее значение коэффициента готовности $K_{\text{г}}$ вычисляют по формуле (2.13)

$$K_{\text{г}} = \sum_{i=1}^N t_i / \left(\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i \right) = \frac{100}{100 + 2} = \frac{100}{102} = 0,984 .$$

Таким образом, коэффициент готовности равен $K_{\text{г}} = 0,984$.

- показателем готовности;
- комплексным, так как характеризует безотказность, ремонтпригодность и готовность;
- эксплуатационным, так как определяется по результатам эксплуатации;
- единичным, так как характеризует надежность одного изделия.

Задача 5. Определить коэффициент технического использования, если известно, что система эксплуатируется в течение 1 года, годовой фонд времени системы составляет 8760 часов. Время проведения ежегодного техосмотра составляет 20 суток, суммарное время, затраченное на ремонтные работы, составляет 20 часов.

Решение:

Коэффициент технического использования определяется по формуле:

$$K_{\text{т.и}} = \frac{T_0}{T_0 + \tau_{\text{т.и}} + \tau_p + \tau_v} = \frac{8760}{8760 + 20 \cdot 24 + 20} = 0,943.$$

Таким образом, коэффициент технического использования равен $K_{\text{т.и}} = 0,943$, показатель является:

- показателем готовности;
- комплексным, так как характеризует безотказность, ремонтпригодность и готовность;
- эксплуатационным, так как определяется по результатам эксплуатации;
- единичным, так как характеризует надежность одного изделия.

Вопросы и задания

Вопросы.

1. Что такое «ресурс» и «срок службы»?
2. Что такое интенсивность отказов и интенсивность восстановления?
3. Расскажите сущность критерия «параметр потока отказов».
4. Объясните разницу между единичными и комплексными показателями надежности объектов.
5. Укажите количественные показатели надежности восстанавливаемых изделий.

6. Перечислите показатели надежности невосстанавливаемых изделий, у которых возможен ремонт отдельных элементов при сохранении работоспособности.

7. Что такое интенсивность отказов изделия и от каких факторов она зависит?

8. Что характеризует коэффициент готовности системы?

9. В каких случаях целесообразно выбрать в качестве показателя надежности вероятность безотказной работы; наработку до отказа; наработку на отказ?

10. Каким соотношением связаны коэффициент готовности компьютерного устройства – K_r и коэффициент простоя – K_p ?

11. Какой показатель ремонтпригодности характеризующий надежность объекта, рекомендуется использовать, если важное значение имеет безотказная работа?

12. Какую формулу необходимо использовать при расчете коэффициента простоя?

13. Дайте определение коэффициента готовности системы.

14. Что такое поток отказов?

15. Назовите известные методы расчета восстанавливаемых систем?

16. Как оценить время восстановления системы?

Задания.

Задание №1. За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зафиксировано 8 отказов. Время восстановления составило:

$t_1 = 12$ мин. $t_2 = 24$ мин. $t_3 = 15$ мин. $t_4 = 9$ мин.

$t_5 = 18$ мин. $t_6 = 30$ мин. $t_7 = 25$ мин. $t_8 = 40$ мин.

Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры.

Задание №2. Коэффициент готовности одной из подсистем автоматизированной системы, которая представляет собой сложную восстанавливаемую систему, равен 0,9. Среднее время ее восстановления

составляет 100 ч. Требуется найти вероятность застать систему в исправном состоянии в момент времени $t = 12$ ч.

Задание №3. В течение некоторого времени проводилось наблюдение за некоторым количеством экземпляров восстанавливаемых изделий. Каждый из образцов проработал t_i часов и имел p_i – число отказов. Требуется определить среднюю наработку на отказ по данным наблюдений за работой всех изделий. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные данные для расчета

Номер варианта	Исходные данные									
	n1	t1	n2	t2	n3	t3	n4	t4	n5	t5
1	1	300	3	600	2	400	-	-	-	-
2	3	90	6	270	4	140	5	23	3	180
3	12	960	15	1112	8	808	7	1490	-	-
4	6	144	5	125	3	80	8	176	5	150
5	6	144	5	125	3	80	-	-	-	-
6	10	1020	26	3120	24	3480	18	2700	-	-
7	18	2700	32	4000	24	3480	16	2080	24	3480
8	3	720	4	1040	2	500	6	1800	-	-
9	1	300	3	600	6	2300	7	2450	-	-
10	3	1650	2	1200	4	2300	-	-	-	-

Задание №4. Отказы пяти восстанавливаемых элементов произошли в следующие моменты времени t :

- I. 1, 3, 9, 21, 32, 41, 43, 47, 52, 66;
- II. 2, 4, 6, 12, 19, 21, 34, 40, 56, 66;
- III. 3, 7, 11, 18, 24, 31, 48, 52, 57, 61;
- IV. 5, 6, 9, 14, 19, 23, 28, 36, 39, 49;
- V. 4, 8, 12, 17, 26, 31, 33, 41, 48, 54;

Определить значение параметра потока отказов $\omega_{CP}(20)$; $\Delta t = 5$ ч.

Задание № 5. Отказы пяти восстанавливаемых элементов произошли в следующие моменты времени t :

- I. 1, 3, 9, 27, 32, 41, 43, 47, 52, 56;
 II. 2, 4, 6, 12, 19, 21, 34, 40, 56, 66;
 III. 3, 7, 11, 18, 24, 33, 48, 52, 57, 61;
 IV. 5, 6, 9, 14, 19, 23, 28, 36, 39, 49;
 V. 4, 8, 12, 17, 26, 31, 33, 41, 48, 54;

Определить значение характеристики потока отказов $m^*_{CP}(35)$.

Задание № 6. На промысловые испытания поставлено 3 вертлюга. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 37 отказа, у второго – 29 отказов, у третьего – 48 отказов. Суммарная наработка на отказ для первого вертлюга составила 3100 часов, для второго – 2200 часов, для третьего – 2700 часов. Определить среднюю наработку до отказа.

Задание № 7. На эксплуатацию поставлено 250 изделий. На моменты времени $t_1 - t_7$ зафиксировано определенное количество отказов (таблица 2.4). Остальные изделия не отказали. Определить средний ресурс.

Таблица 2.4

t_i , час	50	100	150	200	250	300	350
$n(t_i)$	5	8	11	15	21	31	9

Задание № 8 На промысловые испытания поставлено 3 насоса. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 37 отказа, у второго – 29 отказов, у третьего – 48 отказов. Суммарная наработка до отказа для первого насоса составила 3100 часов, для второго – 2200 часов, для третьего – 2700 часов. Определить средний ресурс насоса.

Задание 9. Длительность проведения технического обслуживания для бурового насоса составляет 45 часов. Межремонтный цикл составляет 2335 часов. Определить коэффициент готовности бурового насоса.

Задание 10. Какую длительность восстановления работоспособности должен иметь объект с межремонтным циклом 2000 часов, чтобы коэффициент готовности объекта составлял 0,95.

Задание 11. Определить среднее время восстановления компрессора, если на проведение 5 мелких ремонтов было затрачено 30,5 часа.

Задание 12. Годовое время работы одной буровой лебедки составляет 3500 часов. За год проводится 4 технических обслуживания продолжительностью 65 часов каждое и 1 средний ремонт продолжительностью 360 часов. Определить коэффициент технического использования буровой лебедки.

Задача 13. По данным задачи 3.7 определить коэффициент готовности буровой лебедки.

Задача 14. В ходе наблюдений за работой турбобура были зафиксированы отказы в следующие моменты времени: 110, 167, 284, 365, 512, 650 часов работы. Определить среднюю наработку между отказами турбобура.

Задача 15. По данным задачи 3.9 определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа за 300 и 600 часов работы.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. Надежность технических систем и техногенный риск: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / С.П. Тимошенков, Б.М. Симонов, В.Н. Горошко. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 502 с.

2. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб.пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. – 313 с. : ил. ; 21. – (Учебники для вузов.Специальная литература). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 307-310. – ISBN 978-5-8114-1268-6

3. В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2012. – 368 с.

4 Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. – Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. – 275 с. : ил. – Библиогр.: с. 264-273

Тема 4. Теоретические законы распределения отказов

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3

Тема занятия: «Аналитическое определение количественных характеристик надежности устройств при различных теоретических законах распределения времени безотказной работы»

Цель: сформировать способность использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности.

Актуальность темы. Аналитическая оценка количественных показателей надежности при различных теоретических законах распределения времени безотказной работы важна для оценки качества элементов и систем, поэтому актуально владеть методикой их оценки.

Теоретическая часть

Методические рекомендации к практическому занятию

Для нормального закона распределения времени безотказной работы изделия формулы (3.1) - (3.5) имеют вид

$$P(t) = 0.5 - \Phi(U), U = \frac{t - m_t}{\sigma_t}, \quad (3.1)$$

где m_t – среднее значение случайной величины T ;

σ_t – дисперсия случайной величины T ;

T – время безотказной работы изделия.

$$Q(t) = 0.5 + \Phi(U), \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{U^2}{2}} dU, \quad (3.2)$$

$$f(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma_t}; \varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2}}, \quad (3.3)$$

$$\lambda(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma(t)} * \frac{1}{0.5 - \Phi(U)}, \quad (3.4)$$

где $\Phi(U)$ – функция Лапласа, обладающая свойствами

$$\Phi(0) = 0, \quad (3.5)$$

$$\Phi(-U) = -\Phi(U). \quad (3.6)$$

Значения функции Лапласа $\Phi(U)$ приведены в приложении А.

Значения функции $\varphi(U)$ даны в приложении Б.

Для **распределения Вейбулла времени безотказной работы элемента** формулы (2.1) – (2.5) имеют вид

$$P(t) = e^{\lambda o * t^k}, \quad (3.7)$$

$$Q(t) = 1 - e^{\lambda o * t^k}, \quad (3.8)$$

$$f(t) = \lambda o * k * t^{k-1} * P(t), \quad (3.9)$$

$$\lambda(t) = \lambda o * k * t^{k-1}, \quad (3.10)$$

$$m(t) = \frac{\frac{1}{k} \Gamma(\frac{1}{k})}{\frac{1}{a k}}, \quad (3.11)$$

где a, k – параметры закона распределения Вейбулла;

$\Gamma(x)$ – гамма-функция, значения которой приведены в приложении В.

Для **закона распределения Релея времени безотказной работы изделия** формулы (3.1) – (3.5) имеют вид

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2 * \sigma_t^2}\right), \quad (3.12)$$

$$Q(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2 \cdot \sigma_t^2}\right), \quad (3.13)$$

$$f(t) = \frac{t}{\sigma_t^2} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2 \cdot \sigma_t^2}\right), \quad (3.14)$$

$$\lambda(t) = \frac{t}{\sigma_t^2}, \quad (3.15)$$

$$m(t) = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad (3.16)$$

где σ_t — мода распределения случайной величины T ;

t — время безотказной работы изделия.

Примеры решения задач

Задача 1. Время работы элемента до отказа подчинено нормальному закону с параметрами $m_t = 8000$ час, $t = 2000$ час.

Вычислить количественные характеристики надежности для $t = 10000$ час:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- частоту отказов $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- среднее время безотказной работы m_t .

Решение:

Исходные данные: $m_t = 8000$ час, $t = 2000$ час; $t = 10000$ час.

$$P(t) = 0.5\Phi(U),$$

$$U = (t - m_t)/\sigma_t,$$

$$U = (10000 - 8000)/2000 = 1,$$

$$\Phi(1) = 0,3413,$$

$$P(10000) = 0,5 - 0,3413 = 0,1587.$$

Введем обозначения

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \sigma_t} \exp \left[-\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2} \right],$$

$$\varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2}}; \varphi(-U) = \varphi(U),$$

$$f(t) = (U)/\sigma_t; U = (t - m_t)/\sigma_t,$$

$$f(10000) = (1)/2000 = 0,242/2000 = 12,11 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$\lambda(t) = f(t)/p(t),$$

$$\lambda(10000) = f(10000)/P(10000) = 12,1 \cdot 10^{-5} / 0,1587 = 76,410^{-5} \text{ 1/час},$$

$$m_t = 8000 \text{ час.}$$

Результаты расчета: $P(10000) = 0,1587$; $f(10000) = 12,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}$; $\lambda(10000) = 76,410^{-5} \text{ 1/час}$; $m_t = 8000 \text{ час}$.

Задача 2. Время работы изделия до отказа подчиняется закону распределения Релея.

Вычислить количественные характеристики надежности изделия для $t = 1000 \text{ час}$, если параметр распределения $\sigma_t = 1000 \text{ час}$:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- частоту отказов $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- среднее время безотказной работы m_t .

Решение:

Исходные данные: $\sigma_t = 1000 \text{ час}$; $t = 1000 \text{ час}$.

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2 * \sigma_t^2}\right) = \exp\left(-\frac{1000^2}{2 * 1000^2}\right) = e^{-0,5} = 0,606,$$

$$f(t) = t * p(t)/\sigma_t^2,$$

$$f(1000) = 1000 * 0,606/1000^2 = 0,606 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час},$$

$$\lambda(t) = t/\sigma_t^2,$$

$$\lambda(1000) = 1000/1000^2 = 10^{-1} \text{ 1/час},$$

$$m(t) = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1000 * 1,253 = 1253 \text{ час.}$$

Результаты расчета: $P(1000) = 0,606$; $f(1000) = 0,606 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}$; λ
 $(1000) = 10^{-1} \text{ 1/час}$; $m_t = 1253 \text{ час}$.

Задача 3. Время безотказной работы изделия подчиняется закону Вейбулла с параметрами $k = 1,5$; $a = 10^{-4} \text{ 1/час}$, а время работы изделия $t = 100$ час.

Вычислить количественные характеристики надежности изделия:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- частоту отказов $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- среднее время безотказной работы m_t .

Решение:

Исходные данные: $k = 1,5$; $a = 10^{-4} \text{ 1/час}$; $t = 100 \text{ час}$.

$$P(t) = \exp(-a t^k); P(100) = \exp(-10^{-4} 100^{1,5}); x = 100^{1,5},$$

$$\lg x = 1,5 \lg 100 = 3x = 1000,$$

$$P(100) = e^{-0,1} = 0,9048,$$

$$f(t) = a k t^{k-1} * P(t),$$

$$f(100) = 10^{-4} * 1,5 100^{0,5} * 0,9048 = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час},$$

$$\lambda(t) = f(t)/P(t),$$

$$\lambda(100) = f(100)/P(100) = 1,35 \cdot 10^{-3} / 0,9048 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час},$$

$$m(t) = \frac{\frac{1}{k} \Gamma(\frac{1}{k})}{\frac{1}{a^{\frac{1}{k}}}} = \frac{\frac{1}{1,5} \Gamma(\frac{1}{1,5})}{(10^{-4})^{1/1,5}} = \frac{0,666 * \Gamma(0,666)}{10^{-2,666}}.$$

Так как $z\Gamma(z) = \Gamma(z+1)$, то

$$m(t) = \frac{\Gamma(1,666)}{10^{-2,666}},$$

$$X = 10^{-2,666},$$

$$\lg X = -2,666 \lg 10 = -2,666,$$

$$X = 0,00215,$$

$$m_t = 0,90167/0,00215 = 426 \text{ час}$$

(значение вычислено с использованием данных приложения В).

Результаты расчета: $P(100) = 0,9048$; $f(100) = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}$; λ
 $(100) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}$; $m_t = 426 \text{ час}$.

Вопросы и задания

Вопросы.

1. Какие существуют законы распределения наработки до отказа и области их применения?
2. Какие законы распределения используются в надежности.
3. Какие процессы в техносфере аппроксимируют распределением Вейбулла?
4. Какие процессы в техносфере аппроксимируют распределением Релея?
5. Какие процессы в техносфере аппроксимируют распределением Гаусса?

Задания.

Задание №1. Время работы изделия подчинено нормальному закону с параметрами $m_t = 8000 \text{ час}$, $\sigma_t = 1000 \text{ час}$. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $p(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, m_t для $t = 8000 \text{ час}$.

Задание №2. Время безотказной работы прибора подчинено закону Релея с параметром $\sigma_t = 1860 \text{ час}$. Требуется вычислить $P(t)$, $f(t)$ для $t = 1000 \text{ час}$ и среднее время безотказной работы прибора.

Задание №3. Время исправной работы скоростных шарикоподшипников подчинено закону Вейбулла с параметрами $\kappa = 2,6$, $a = 1,65 \cdot 10^{-7} \text{ 1/час}$.

Вычислить количественные характеристики надежности $p(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ для $t = 150 \text{ час}$ и среднее время безотказной работы шарикоподшипников.

Задание №4. Вероятность безотказной работы изделия в течение $t = 1000 \text{ час}$. $P(1000) = 0,95$. Время исправной работы подчинено закону Релея.

Определить количественные характеристики надежности $f(t)$, $\lambda(t)$, m_t .

Задание №5. Среднее время исправной работы изделия равно 1260 час. Время исправной работы подчинено закону Релея.

Найти его количественные характеристики надежности $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ для $t = 1000$ час.

Задание № 6. По результатам наблюдений за работой объекта средняя наработка до отказа равна 2000 часов, среднеквадратическое отклонение 400 часов. Определить значения наработок до отказа, которые соответствуют вероятности отказа 0,9; 0,5; 0,005. Закон распределения отказов – нормальный.

Задание № 7. Предельно допустимое значение ресурса составляет 7000 часов, среднее квадратическое отклонение 1000 часов. Определить средний ресурс, вероятность отказа и вероятность безотказной работы при 5000 часах.

Задание № 8. В результате изучения процесса изнашивания клыка роторного экскаватора установлено, что средняя величина износа соответствует 5 мм, дисперсия 0,01 мм². Какова вероятность того, что найденное значение износа превышает среднее, не более чем на 5 %.

Задание № 9. Средняя наработка на отказ соответствует 1500 часам, коэффициент вариации 0,3. Определить показатели надежности для наработок 1000 часов, 2000 часов, 3000 часов.

Задание № 10. Среднее квадратическое отклонение ресурса равно 400 часам, коэффициент вариации 0,3. Определить показатели надежности для наработок 1000 часов, 2000 часов, 3000 часов.

Задание № 11. На испытания установлено 200 задвижек. Через 1000 часов работы отказало 50 задвижек, через 2000 часов еще 20 задвижек. Определить количество отказавших задвижек в промежутке времени от 1500 часов до 3000 часов работы, если среднее квадратическое отклонение ресурса 500 часов.

Задание № 12. На испытания установлено 100 долот. Через 150 часов работы отказало 50 долот, через 50 часов еще 2 долота. Определить количество отказавших долот в промежутке времени от 200 часов до 250 часов работы, если коэффициент вариации ресурса 0,1.

Задание № 13. Минимальная наработка на отказ составляет 3000 часов, средняя наработка 1200 часов. Определить количество отказавших изделий при наработке 9000 часов и характеристики надежности.

Задание № 14. Определить вероятность отказа изделия при наработке 1500 часов, если коэффициент вариации равен 0,2, нижнее предельно-допустимое значение наработки составляет 2000 часов.

Задание № 15. Предельно допустимое значение наработки на отказ составляет 1600 часов, максимальное значение 2000 часов. Определить вероятность отказа при наработке 1200 часов и характеристики данного распределения.

Задание № 16. Нарботка до отказа изделия подчиняется закону Вейбулла с параметрами $\alpha=1,5$ и $\lambda=10^{-4}$ 1/час. Определить количественные характеристики надежности изделия за время работы изделия 100 час.

Задание № 17. Вероятность безотказной работы автоматической линии изготовления штоков бурового насоса в течение 120 час равна 0,95. Определить интенсивность отказов линии для момента времени 120 часов и среднее время безотказной работы. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности.

Задание № 18. Среднее время безотказной работы автоматической системы управления равно 640 час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение 120 часов, частоту отказов для момента времени 120 часов и интенсивность отказов.

Задание № 19. Время исправной работы скоростных шарикоподшипников подчинено закону Вейбулла с параметрами $\alpha=2,6$; $\lambda = 1,65 \cdot 10^{-7}$ 1/час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности для времени 150 часов и среднее время безотказной работы шарикоподшипников.

Задание № 20. Определить вероятность безотказной работы и интенсивность отказов прибора при $t = 1300$ часов работы, если при

испытаниях получено значение среднего времени безотказной работы $M_t=1500$ часов и среднее квадратическое отклонение $\sigma_t=100$ час.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. Надежность технических систем и техногенный риск: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / С.П. Тимошенков, Б.М. Симонов, В.Н. Горошко. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 502 с.

2. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб.пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. – 313 с. : ил. ; 21. – (Учебники для вузов.Специальная литература). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 307-310. – ISBN 978-5-8114-1268-6

3. В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2012. – 368 с.

4 Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб.пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. – Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. – 275 с. : ил. – Библиогр.: с. 264-273

Тема 4. Теоретические законы распределения отказов

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4

Тема занятия: «Аналитическое определение количественных характеристик надежности устройств при экспоненциальном распределении времени безотказной работы»

Цель: сформировать способность использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности; изучить количественные показатели оценки надежности восстанавливаемых систем; получить аналитические выражения для показателей надежности восстанавливаемой системы и рассчитать их.

Актуальность темы. Аналитическая оценка количественных показателей надежности при экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы важна для оценки качества элементов и систем, поэтому актуально владеть методикой их оценки.

Теоретическая часть

Методические рекомендации к практическому занятию

Основные расчетные формулы

Вероятность безотказной работы изделия на интервале времени от 0 до t $P(t)$

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (4.1)$$

Вероятность отказа изделия на интервале времени от 0 до t $Q(t)$

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (4.2)$$

Частота отказов изделия $f(t)$

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (4.3)$$

Интенсивность отказов изделия $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (4.4)$$

Зависимость интенсивности отказов $\lambda(t)$ от условий эксплуатации изделия (климатических, механических, радиационных воздействий и т. п.)

$$\lambda(t) = \lambda_0 \prod_{i=1}^n a_i, \quad (4.5)$$

где λ_0 – интенсивность отказов изделий при нормальных условиях эксплуатации;

a_i – поправочный коэффициент i -го эксплуатационного фактора.

Среднее время безотказной работы изделия $m(t)$

$$m_t = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (4.6)$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы изделия формулы (2.1) – (2.5) имеют вид

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (4.7)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (4.8)$$

$$f(t) = \lambda * e^{-\lambda t}, \quad (4.9)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda * e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda, \quad (4.10)$$

$$m_t = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.11)$$

Примеры решения задач

Задача 1. Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/час.

Вычислить количественные характеристики надежности элемента для $t = 1000$ час:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- вероятность отказа $Q(t)$;
- частоту отказов $f(t)$;
- среднее время безотказной работы m_t .

Решение:

Исходные данные: $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/час; $t = 1000$ час.

$$P(1000) = e^{-\lambda t} = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 0,9753$$

(значение вычислено с использованием данных приложения Г)

$$Q(1000) = 1 - P(1000) = 0,0247$$

$$f(t) = \lambda(t) * P(t) = 2,5 \cdot 10^{-5} * e^{-2,5 \cdot 10^{-5} * t},$$

$$f(t) = 2,5 \cdot 10^{-5} * e^{-2,5 \cdot 10^{-5} * 1000} = 2,5 \cdot 10^{-5} * 0,9753 = 2,439 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$m_t = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ час.}$$

Результаты расчета: $P(1000) = 0,9753$; $Q(1000) = 0,0247$; $f(1000) = 2439 \cdot 10^{-5}$ 1/час; $m_t = 40000$ час.

Вопросы и задания.

Вопросы.

1. Какие существуют законы распределения наработки до отказа и области их применения?
2. Какие законы распределения используются в надежности.

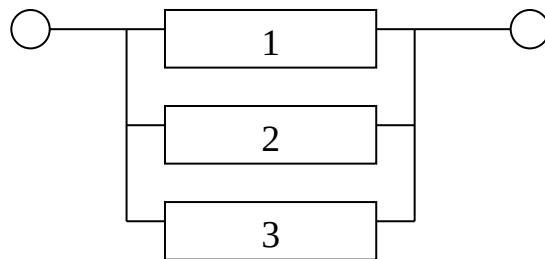
3. Какие процессы в техносфере аппроксимируют экспоненциальным распределением?

Задания.

Задание №1. Вероятность безотказной работы автоматической линии изготовления цилиндров автомобильных двигателей в течение 120 час равна 0,9. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности.

Рассчитать интенсивность отказов и частоту отказов линии для момента времени $t = 120$ час, а также среднее время безотказной работы.

Задание №2. Для схемы соединения элементов по надежности



$$T_1 = 100 \text{ ч}; \quad T_2 = 50 \text{ ч}; \quad T_3 = 20 \text{ ч}.$$

Задание №3. Определить среднее время работы до отказа при экспоненциальном законе распределения безотказной работы каждого элемента. Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/час.

Вычислить количественные характеристики надежности элемента для $t = 2000$ час: вероятность безотказной работы $P(t)$; вероятность отказа $Q(t)$; частоту отказов $f(t)$; среднее время безотказной работы m_t .

Задание №4. Среднее время безотказной работы автоматической системы управления равно 640 час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение 120 часов, частоту отказов для момента времени 120 часов и интенсивность отказов.

Задание № 5. Вероятность безотказной работы автоматической линии изготовления штоков бурового насоса в течение 120 час равна 0,95.

Определить интенсивность отказов линии для момента времени 120 часов и среднее время безотказной работы. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. Надежность технических систем и техногенный риск: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / С.П. Тимошенко, Б.М. Симонов, В.Н. Горошко. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 502 с.

2. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб. пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. – 313 с. : ил. ; 21. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 307-310. – ISBN 978-5-8114-1268-6

3. В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2012. – 368 с.

4 Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. – Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. – 275 с. : ил. – Библиогр.: с. 264-273

Тема 5. Резервирование как метод повышения надежности системы
Классификация способов резервирования и их характеристика.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5

Тема занятия: «Расчет надежности технических систем с последовательным соединением элементов»

Цель: сформировать способность использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности; изучить количественные показатели оценки надежности восстанавливаемых систем; получить аналитические выражения для показателей надежности восстанавливаемой системы и рассчитать их.

Актуальность темы. Аналитическая оценка параметров надежности технических систем с последовательным соединением элементов важна для оценки качества элементов и систем, поэтому актуально владеть методикой их оценки.

Теоретическая часть

Методические рекомендации к практическому занятию

Надежность технических систем зависит от того, каким образом элементы объединены в систему, какова функция каждого из них и в какой мере исправная работа каждого элемента необходима для работы системы в целом [3].

Представление о связи надежности изделия и надежностью его элементов дает параллельно – последовательная структура надежности.

Соединение элементов называется **последовательным**, если отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Такое соединение

элементов в технике встречается наиболее часто, поэтому его называют **основным соединением**.

Система последовательно соединенных элементов работоспособна тогда, когда работоспособны все ее элементы.

Обратите внимание, что «последовательным» соединением элементов является только в смысле надежности, физически они могут быть соединены как угодно.

Основные расчетные формулы

Вероятность безотказной работы системы при последовательном соединении элементов за время t $P_c(t)$

$$P_c(t) = P_1(t) * P_2(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - Q_i(t)), \quad (5.1)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента за время t .

Если все элементы обладают одинаковой надежностью $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_n(t)$, то

$$P_c(t) = P(t)^n. \quad (5.2)$$

Выражение $P_c(t)$ через интенсивность отказов $\lambda_i(t)$ элементов системы имеет вид

$$P_c(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt\right) \quad (5.3)$$

или

$$P_c(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_c dt\right), \quad (5.4)$$

где

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t), \quad (5.5)$$

где $\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов i -го элемента;

$\lambda_c(t)$ – интенсивность отказов системы.

Выражения 5.3 и 5.4 позволяют определить вероятность безотказной работы изделий до первого отказа при любом законе изменения интенсивности отказов во времени.

Вероятность отказа системы на интервале времени $(0, \dots, t) Q_c(t)$

$$Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (5.6)$$

Частота отказов системы $f_c(t)$

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt}. \quad (5.7)$$

Интенсивность отказов системы $\lambda_c(t)$

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)}. \quad (5.8)$$

Среднее время безотказной работы системы

$$m_{tc} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt. \quad (5.9)$$

При экспоненциальном законе надежности всех элементов системы

$$\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}, \quad (5.10)$$

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \lambda_c, \quad (5.11)$$

$$P_i(t) = \exp(-\lambda * t), \quad (5.12)$$

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c * t}, \quad (5.13)$$

$$f_c(t) = \lambda_c * e^{-\lambda_c t}, \quad (5.14)$$

$$Q_c(t) = 1 - e^{-\lambda_c * t}, \quad (5.15)$$

$$m_{tc} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (5.16)$$

$$m_{tc} = \frac{1}{\lambda_i}, \quad (5.17)$$

где m_{ti} – среднее время безотказной работы i -го элемента.

Примеры решения задач

Задача 1. Система состоит из 10 независимых элементов, надежность каждого из которых равна $P = 0,95$. Рассчитать надежность системы.

Решение:

Исходные данные: $N = 10$; $P = 0,95$.

$$P_c(t) = P^n(t) = 0,95^{10} \approx 0,6.$$

Результаты расчета: $P_c(t) \approx 0,6$.

Задача 2 . Простая система состоит из 1000 одинаково надежных, независимых элементов. Рассчитать, какой надежностью должен обладать каждый из них для того, чтобы надежность системы была не меньше 0,9.

Решение:

Исходные данные: $N = 1000$; $P_c = 0,9$.

$$P = \sqrt[n]{P_c} = \sqrt[1000]{0,9} = 0,9999.$$

Результаты расчета: $P = 0,9999$.

Задача 3. Простая система S состоит из трех независимых элементов, плотности распределения времени безотказной работы которых заданы формулами (при $0 < t < 1$):

$$f_1(t) = 1; f_2(t) = 2t; f_3(t) = 2(1-t).$$

Определить интенсивность отказа системы.

Решение:

Исходные данные: $N = 3$; $f_1(t) = 1$; $f_2(t) = 2t$; $f_3(t) = 2(1-t)$.

Ненадежность каждого элемента:

$$q_1(t) = 1; q_2(t) = t^2; q_3(t) = 2t - t^2.$$

Надежность элементов:

$$p_1(t) = 1-t; p_2(t) = 1-t^2; p_3(t) = 1-2t-t^2.$$

Интенсивность отказа элементов:

$$\lambda_1(t) = 1/(1-t); \lambda_2(t) = 2t/(1-t^2); \lambda_3(t) = 2/(1-t)/(1-2t-t^2).$$

Надежность системы $\lambda_c = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \lambda_3(t)$.

Результаты расчета: $\lambda_c = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \lambda_3(t)$.

Задача 4. Система состоит из двух устройств. Вероятности безотказной работы каждого из них в течение времени $t = 100$ час равны: $P_1(100) = 0,95$; $P_2(100) = 0,97$. Справедлив экспоненциальный закон надежности. Найти среднее время безотказной работы системы m_{tc} .

Решение:

Исходные данные: $N = 2$; $P_1(100) = 0,95$; $P_2(100) = 0,97$.

Вероятность безотказной работы изделия

$$P_c(100) = P_1(100) * P_2(100) = 0,95 * 0,97 = 0,92.$$

Интенсивность отказов изделия $P_c(t) = e^{-\lambda_c t}$

или

$$P_c(100) = 0,92 = e^{-\lambda_c * 100}$$

или $\lambda_c = 0,83 * 10^{-3}$ 1/час (при расчете использованы данные приложения Г).

$$m_{tc} = 1/\lambda_c = 1/(0,83 * 10^{-3}) = 1200 \text{ час.}$$

Результаты расчета: $m_{tc} = 1200$ час.

Задача 5. Определить среднее время безотказной работы системы, если система состоит из трех элементов, среднее время безотказной работы которых равны 400, 200 и 500 часов, закон распределения – экспоненциальный.

Решение:

Определим интенсивности отказов элементов

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{400} = 0,0025 \text{ 1/час}; \quad \lambda_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{200} = 0,005 \text{ 1/час};$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{500} = 0,002 \text{ 1/час.}$$

Интенсивность отказа системы

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0,0025 + 0,005 + 0,002 = 0,0095 \text{ 1/час.}$$

Наработку до отказа системы рассчитаем по формуле (3.8)

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,0095} = 105,3 \text{ час.}$$

Таким образом, наработка до отказа $T = 105,3 \text{ час.}$

Вопросы и задания

Вопросы

1. Что такое основное соединение элементов?
2. Как рассчитывают вероятность безотказной работы при последовательном соединении элементов?
3. Как рассчитывают частоту и интенсивность отказов при последовательном соединении элементов?
4. Как рассчитывают основные показатели надежности при последовательном соединении элементов в случае экспоненциального распределения случайных величин?
5. Какие существуют законы распределения случайных величин?

Задания

Задание №1. Аппаратура связи состоит из 2000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = 0,33 * 10^{-5} \text{ 1/час.}$

Определить вероятность безотказной работы аппаратуры в течении $t = 200 \text{ час}$ $P(t)$ и среднее время безотказной работы аппаратуры m_t .

Задание №2. Невосстанавливаемая в процессе работы электронная машина состоит из 200000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda = 0,2 * 10^{-6} \text{ 1/час.}$

Определить вероятность безотказной работы электронной машины в течении $t = 24 \text{ часа}$ и среднее время безотказной работы электронной машины.

Задание №3. Система управления состоит из 6000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = 0,16 * 10^{-6} \text{ 1/час.}$ Необходимо определить

вероятность безотказной работы в течении $t = 50$ час и среднее время безотказной работы.

Задание №4. Предположим, что для работы системы с последовательным соединением элементов при полной нагрузке необходимы два разнотипных насоса, причем насосы имеют постоянные интенсивности отказов, равные соответственно $\lambda_1 = 0,0001$ 1/час и $\lambda_2 = 0,0002$ 1/час.

Вычислить среднее время безотказной работы данной системы T_0 и вероятность её безотказной работы в течение 100 час P_c . Предполагается, что оба насоса начинают работать с момента времени $t = 0$.

Задание №5. Вероятность безотказной работы одного элемента в течение времени t равна $P(t) = 0,9997$.

Определить вероятность безотказной работы системы $P^n_c(t)$, состоящей из $n = 100$ таких же элементов.

Задание № 6. Система состоит из 12000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = 0,30 \cdot 10^{-6}$ 1/час.

Определить: вероятность безотказной работы системы в течение времени t $P_c(t)$; вероятность отказа системы в течение времени t $q_c(t)$; частоту отказов или плотность вероятности времени T безотказной работы системы $f_c(t)$; среднее время безотказной работы системы m_{tc} для $t = 50$ час.

Задание №7. Прибор состоит из $n = 5$ узлов. Надежность узлов характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени t , которая равна: $P_1(t) = 0,98$; $P_2(t) = 0,99$; $P_3(t) = 0,998$; $P_4(t) = 0,975$; $P_5(t) = 0,985$.

Определить вероятность безотказной работы прибора.

Задание №8. Система состоит из пяти приборов, среднее время безотказной работы которых равно: $m_{t1} = 83$ час; $m_{t2} = 220$ час; $m_{t3} = 280$ час; $m_{t4} = 400$ час; $m_{t5} = 700$ час. Для приборов справедлив экспоненциальный закон надежности.

Найти среднее время безотказной работы системы.

Задание №9. Прибор состоит из пяти блоков. Вероятность безотказной работы каждого блока в течение времени $t = 50$ час равна: $P_1(50) = 0,98$; $P_2(50) = 0,99$; $P_3(50) = 0,998$; $P_4(50) = 0,975$; $P_5(50) = 0,985$. Справедлив экспоненциальный закон надежности.

Найти среднее время безотказной работы прибора.

Задание № 10. Вероятность безотказной работы системы в течение времени t равна $P_c(t) = 0,95$. Система состоит из $n = 120$ равнонадежных элементов.

Найти вероятность безотказной работы элемента $P_i(t)$.

Задание № 11. Определить вероятность безотказной работы системы, состоящей из 500 элементов, если вероятность безотказной работы каждого элемента в течение времени t равна $P(t) = 0,998$.

Задание № 12.. Вероятность безотказной работы системы, состоящей из 150 равнонадежных элементов, в течение времени t равна $P_c(t)=0,95$. Найти вероятность безотказной работы элемента.

Задание № 13.. Блок управления состоит из 5000 элементов, средняя интенсивность отказов которых равна $2,3 \cdot 10^{-6}$ 1/час. Определить вероятность безотказной работы в течении $t = 100$ час и среднее время безотказной работы.

Задание № 14. Система состоит из пяти элементов, среднее время безотказной работы которых равно: $T_1=104$ час; $T_2=200$ час; $T_3=185$ час; $T_4=350$ час; $T_5=620$ час. Показатели распределены по экспоненциальному закону. Определить среднее время безотказной работы системы.

Задание № 15. Прибор состоит из пяти блоков. Вероятность безотказной работы каждого блока в течение времени $t = 50$ час равна: $P_1(50)=0,98$; $P_2(50)=0,99$; $P_3(50)=0,998$; $P_4(50)=0,975$; $P_5(50)=0,985$. Справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется найти среднее время безотказной работы прибора.

Задание № 16. Установка состоит из 3000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $3,8 \cdot 10^{-6}$ 1/час. Определить вероятность отказа

установки в течении $t = 300$ час и среднее время безотказной работы аппаратуры.

Задание № 17. Объект состоит из 200000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $0,2 \cdot 10^{-6}$ 1/час. Определить вероятность безотказной работы системы в течение 240 часов и среднее время безотказной работы.

Задание № 18. Прибор состоит из 5 узлов. Надежность узлов характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени t , которая равна: $P_1(t)=0,98$; $P_2(t)=0,99$; $P_3(t)=0,998$; $P_4(t)=0,975$; $P_5(t)=0,985$. Необходимо определить вероятность безотказной работы прибора.

Задание № 19. Определить количество равнонадежных резервных элементов с вероятностью безотказной работы $P_i(t)=0,9$, необходимых для того, чтобы обеспечить вероятность безотказной работы системы равную $P_c(t)=0,99$.

Задание № 20. Система состоит из четырех элементов, имеющих интенсивность отказов равную $\lambda_1 = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/час, $\lambda_2 = 3,2 \cdot 10^{-7}$ 1/час, $\lambda_3 = 2,1 \cdot 10^{-7}$ 1/час, $\lambda_4 = 4,3 \cdot 10^{-7}$ 1/час. Изобразить структурную схему системы и определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа в течение 60 часов при общем резервировании системы.

Задание № 21. Система состоит из четырех элементов, имеющих интенсивность отказов равную $\lambda_1 = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/час, $\lambda_2 = 3,2 \cdot 10^{-7}$ 1/час, $\lambda_3 = 2,1 \cdot 10^{-7}$ 1/час, $\lambda_4 = 4,3 \cdot 10^{-7}$ 1/час. Изобразить структурную схему системы и определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа в течение 60 часов при поэлементном резервировании системы.

Задание № 22. Система состоит из одного элемента с вероятностью безотказной работы равной 0,93, резервный элемент имеет вероятность безотказной работы 0,95. Определить вероятность безотказной работы системы после замещения основного элемента резервным, сделать вывод.

Задание № 23. Система состоит из трех элементов с вероятностью безотказной работы равной $P_1(t)=0,9$, $P_2(t)=0,92$, $P_3(t)=0,87$. Определить

вероятности безотказной работы системы при различных вариантах резервирования.

Задание № 24. Определить количество резервных элементов с вероятностью отказа равной 0,05, для того, чтобы вероятность безотказной работы системы была равна $P_c(t)=0,999$.

Задание № 25. Система состоит из трех элементов с вероятностью безотказной работы равной $P_1(t)=0,9$, $P_2(t)=0,92$, $P_3(t)=0,87$. Определить время безотказной работы системы при общем резервировании.

Задание № 26. Система состоит из трех элементов с вероятностью безотказной работы равной $P_1(t)=0,9$, $P_2(t)=0,92$, $P_3(t)=0,87$. Определить время безотказной работы системы при поэлементном резервировании.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2012. – 368 с.

2Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. – Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. – 275 с. : ил. – Библиогр.: с. 264-273

3. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб. пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. – 313 с. : ил. ; 21. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 307-310. –

Тема 5. Резервирование как метод повышения надежности системы

Классификация способов резервирования и их характеристика.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6

Тема занятия: «Расчет характеристик надежности невосстанавливаемых резервированных систем»

Цель: сформировать способность использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности; изучить количественные показатели оценки надежности восстанавливаемых систем; получить аналитические выражения для показателей надежности восстанавливаемой системы и рассчитать их.

Актуальность темы. Аналитическая оценка параметров надежности резервированных технических систем важна для оценки качества элементов и систем, поэтому актуально владеть методикой их оценки.

Теоретическая часть

Методические рекомендации к практическому занятию

Резервирование – одно из основных средств обеспечения заданного уровня надежности объекта при недостаточно надежных компонентах и элементах.

Цель резервирования– обеспечить безотказность объекта в целом, т. е. сохранить его работоспособность, когда возник отказ одного или нескольких элементов.

Основные расчетные формулы

Вероятность отказа системы $q_c(t)$

$$q_c(t) = \prod_{j=0}^m q_i(t), \quad (6.1)$$

где $q_j(t)$ – вероятность отказа j го элемента.

Вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$

$$P_c(t) = 1 - \prod_{j=0}^m [1 - P_j(t)], \quad (6.2)$$

где $P_j(t)$ – вероятность безотказной работы j го элемента.

Если $P_j(t) = P(t), j = 0, 1, \dots, m$, то

$$\begin{aligned} q_c(t) &= q^{m+1}(t), \\ P_c(t) &= 1 - [1 - P(t)]^{m+1}, \end{aligned} \quad (6.3)$$

При экспоненциальном законе распределения случайных величин

$$\begin{aligned} P_j(t) &= P(t) = e^{-\lambda t}, \\ q_c(t) &= (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}, \\ P_c(t) &= 1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}, \\ m_{tc} &= \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+i}. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Количественные характеристики надежности системы с общим резервированием (резервные цепи включены постоянно).

Вероятность безотказной работы j -ой цепи $P_j(t)$

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^n P_{ij}(t); j = 0, 1, \dots, m, \quad (6.5)$$

где $P_{ij}(t), j = 0, 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, 3, \dots, n$ – вероятность безотказной работы элемента Ξ_{ij} .

Вероятность отказа j -ой цепи $q_j(t)$

$$q_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t). \quad (6.6)$$

Вероятность отказа системы с общим резервированием $q_c(t)$

$$q_c(t) = \prod_{j=0}^n \left[1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t) \right]. \quad (6.7)$$

Вероятность безотказной работы системы с общим резервированием
 $P_c(t)$

$$P_c(t) = 1 - \prod_{j=0}^n \left[1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t) \right]. \quad (6.8)$$

Частный случай: основная и резервные цепи имеют одинаковую надежность, т. е.

$$P_{ij}(t) = P_i(t). \quad (6.9)$$

Тогда

$$q_c(t) = \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}, \quad (6.10)$$

$$P_c(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}. \quad (6.11)$$

При экспоненциальном законе распределения случайных величин

$$P_i(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.12)$$

формулы (4.10), (4.11) примут вид

$$q_c(t) = (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}, \quad (6.13)$$

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}, \quad (6.14)$$

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (6.15)$$

где λ_0 — интенсивность отказов цепи, состоящей из n элементов.

Частота отказов системы с общим резервированием $f_c(t)$

$$f_c(t) = -\frac{dp_c(t)}{dt} = \lambda_0 * (m+1) * e^{-\lambda_0 t} * (1 - e^{-\lambda_0 t})^n. \quad (6.16)$$

Интенсивность отказов системы с общим резервированием $\lambda_c(t)$

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{\lambda_0 * (m+1) * e^{-\lambda_0 t} * (1 - e^{-\lambda_0 t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}}. \quad (6.17)$$

Среднее время безотказной работы резервированной системы m_{tc}

$$m_{tc} = T_0 \sum_{j=0}^n \frac{1}{1+j}, \quad (6.18)$$

где $T_0 = 1/\lambda_0$ – среднее время безотказной работы нерезервированной системы.

Примеры решения задач**Пример 1**

Система состоит из 10 равнонадежных элементов, среднее время безотказной работы элемента $m_t = 1000$ час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов системы и основная и резервная системы равнонадежны.

Найти среднее время безотказной работы системы m_{tc} , а также частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ в момент времени $t = 50$ час в следующих случаях:

- а) нерезервированной системы;
- б) дублированной системы при постоянно включенном резерве.

Алгоритм решения

Исходные данные: $n = 10$; $m_{ti} = 1000$ час; $t = 50$ час.

$$\text{а) } \lambda_o = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

где λ_c — интенсивность отказов системы;

λ_i — интенсивность отказов i -го элемента; $n = 10$.

$$\lambda_i = 1/m_{ti} = 1/1000 = 0,001; i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\lambda_c = n * \lambda_i = 0,001 * 10 = 0,01 \text{ 1/час};$$

$$m_{tc} = 1/\lambda_c = 100 \text{ час};$$

$$f_c(t) = \lambda_c(t) * P_c(t);$$

$$\lambda_c(50) = \lambda_c; P_c(t) = e^{-\lambda t};$$

$$f_c(50) = \lambda_c * e^{-\lambda t} = 0,01 * e^{-0,01 * 50 * 0,001} \text{ 1/час};$$

$$\lambda_c(50) = 0,01 \text{ 1/час}.$$

Результаты расчета: а) $m_{tc} = 100$ час; $f_c(50) = 0,01 * e^{-0,01 * 50 * 0,001} \text{ 1/час};$
 $\lambda_c(50) = 0,01 \text{ 1/час};$

$$\text{б) } m_{tc} = \frac{1}{\lambda_c} \sum_{j=0}^n \frac{1}{1+j} = \frac{1}{0,01} \left(1 + \frac{1}{2}\right) = 150 \text{ час},$$

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}, \quad \lambda_0 = \lambda_c = 0,01 \text{ 1/час},$$

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^2 = 2 e^{-\lambda_0 t} - e^{-2\lambda_0 t},$$

$$f_c(t) = -\frac{dp_c(t)}{dt} = 2\lambda_0 e^{-\lambda_0 t} * (1 - e^{-\lambda_0 t}),$$

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{2\lambda_0(1 - e^{-\lambda_0 t})}{2 - e^{-\lambda_0 t}},$$

$$f_c(50) = 4,8 * 10^{-3} \text{ 1/час},$$

$$\lambda_c(50) = 5,7 * 10^{-3} \text{ 1/час}.$$

Результаты расчета: $m_{tc} = 150$ час; $f_c(50) = 4,8 * 10^{-3} \text{ 1/час};$ $\lambda_c(50)$
 $= 5,7 * 10^{-3} \text{ 1/час}.$

Вопросы и задания

Вопросы.

1. Что такое резервирование и какова его цель?

2. Приведите формулы для расчета основных показателей надежности резервированных систем.

3. Приведите количественные характеристики и основные расчетные формулы для определения параметров системы с общим резервированием.

Задания.

Задание №1. Приемник состоит из трех блоков: УВЧ, УПЧ и УНЧ. Интенсивности отказов этих блоков соответственно равны: $\lambda_1 = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/час; $\lambda_2 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ 1/час; $\lambda_3 = 3 \cdot 10^{-4}$ 1/час.

Рассчитать вероятность безотказной работы приемника при $t = 100$ час для следующих случаев: а) резерв отсутствует; б) имеется общее дублирование приемника в целом.

Задание №2. В системе телеуправления применено дублирование канала управления. Интенсивность отказов канала $\lambda = 10^{-2}$ 1/час.

Рассчитать вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ при $t = 10$ час, среднее время безотказной работы m_{tc} , частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ системы.

Задание №3. В радиопередатчике, состоящем из трех равнонадежных каскадов ($n = 3$) применено общее постоянное дублирование всего радиопередатчика. Интенсивность отказов каскада равна $\lambda(t) = 5 \cdot 10^{-4}$ 1/час. Определить $P_c(t)$, m_{tc} , $f_c(t)$, $\lambda_c(t)$ радиопередатчика с дублированием.

Задание №4. Радиоэлектронная аппаратура состоит из трех блоков I, II, III. Интенсивности отказов этих трех блоков соответственно равны: λ_1 , λ_2 , λ_3 .

Определить вероятность безотказной работы аппаратуры $P_c(t)$ для следующих случаев:

а) резерв отсутствует;

б) имеется дублирование радиоэлектронной аппаратуры в целом.

Задание №5. Нерезервированная система управления состоит из $n = 4000$ элементов. Известна требуемая вероятность безотказной работы системы $P_c(t) = 0,9$ при $t = 100$ час.

Рассчитать допустимую среднюю интенсивность отказов одного элемента, считая элементы равнонадежными, для того чтобы приближенно оценить достижение заданной вероятности безотказной работы при отсутствии профилактических осмотров в следующих случаях: а)

резервирование отсутствует ; б) применено общее дублирование.

Задание №6. Устройство обработки состоит из трех одинаковых блоков. Вероятность безотказной работы устройства $P_y(t_i)$ в течение $(0, \dots, t_i)$ должна быть не менее 0,9.

Определить, какова должна быть вероятность безотказной работы каждого блока в течение $(0, \dots, t_i)$ для случаев: а) резерв отсутствует; б) имеется пассивное общее резервирование с неизменной нагрузкой всего устройства в целом; в) имеется пассивное раздельное резервирование с неизменной нагрузкой по блокам.

Задание № 7. Вычислить вероятность безотказной работы $P(t)$ и наработку на отказ T невосстанавливаемого ОЗУ, состоящего из 2-х блоков ОЗУ₁ и ОЗУ₂. Невосстанавливаемое ОЗУ обеспечивает хранение, запись и считывание информации, если в работоспособном состоянии находится по крайней мере один блок ОЗУ; второй блок ОЗУ используется в режиме горячего резерва и может заменить ОЗУ₁ на период его ремонта. Интенсивности отказов блоков ОЗУ постоянны во времени и равны: $\lambda_1 = \lambda_2$, в процессе эксплуатации ОЗУ обслуживается одной ремонтной бригадой. Оба блока ОЗУ восстанавливаемые. Параметры потоков восстановления блоков ОЗУ постоянны во времени и равны $\mu_1 = \mu_2$. Потоки отказов и восстановлений блоков ОЗУ считать простейшими. Принять, что в момент включения оба блока ОЗУ исправны.

Задание №8. Среднее время безотказной работы автоматической системы управления 640 час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Определить вероятность безотказной работы в течение 120 час, частоту отказов для момента времени $t = 120$ час и интенсивность отказов.

Задание № 9. Для схемы соединения элементов по надежности (рисунок 6.1) определить среднее время работы до отказа при экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого элемента, если $\lambda_1 = 10^{-1}$; $\lambda_2 = 5 \cdot 10^{-2}$; $\lambda_3 = 2 \cdot 10^{-2}$

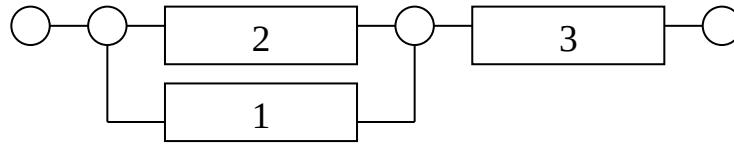


Рисунок 6.1 – Схема соединения элементов.

Задание №10. Для схемы соединения элементов по надежности (рисунок 6.2) определить среднее время работы до отказа при экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого элемента, если $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-2}$; $\lambda_2 = 1 \cdot 10^{-2}$; $\lambda_3 = 5 \cdot 10^{-2}$; $\lambda_4 = 4 \cdot 10^{-2}$.

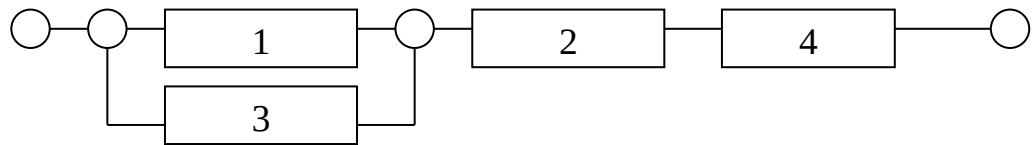


Рисунок 6.2 – Схема соединения элементов.

Задание №11. Для схемы соединения элементов по надежности (рисунок 6.3) определить среднее время работы до отказа при экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого элемента, если $\lambda_1 = 10^{-2}$; $\lambda_2 = 10^{-1}$; $\lambda_3 = 2 \cdot 10^{-2}$; $\lambda_4 = 4 \cdot 10^{-2}$.

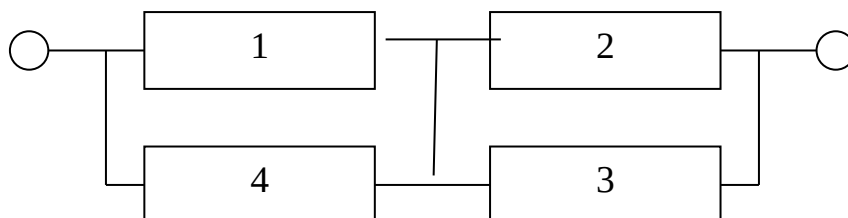


Рисунок 6.3 – Схема соединения элементов.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2012. – 368 с.
2. Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. – Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. – 275 с. : ил. – Библиогр.: с. 264-273
3. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб. пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. – 313 с. : ил. ; 21. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 307-310. – ISBN 978-5-8114-1268-6
6. <http://www.tehdok.ru/> - Интернет-проект Техдок. ру - Форум специалистов по охране труда.
7. <http://novtex.ru/bjd/> - Журнал «Безопасность жизнедеятельности».
8. <http://www.complexdoc.ru/> - База нормативных документов и технических стандартов.

Тема 6. Основы расчета надежности технических систем по надежности их элементов.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 7

Тема занятия: «Структурно-логический анализ технических систем. Расчет мостиковых и комбинированных схем»

Цель: сформировать способность использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности; изучить количественные показатели оценки надежности восстанавливаемых систем; получить аналитические выражения для показателей надежности восстанавливаемой системы и рассчитать их.

Актуальность темы. Структурно-логическая оценка надежности технических систем важна для оценки качества элементов и систем, поэтому актуально владеть методикой их оценки.

Теоретическая часть

Методические рекомендации к практическому занятию

На ранних стадиях проектирования технических систем (ТС) важно оценить надежность объекта, выявить наиболее ненадежные узлы и детали, определить наиболее эффективные меры повышения показателей надежности.

Решение этих задач возможно после **предварительного структурно-логического анализа системы.**

При определении структуры ТС, в первую очередь, необходимо оценить влияние каждого элемента и его работоспособности на работоспособность системы в целом. С этой точки зрения целесообразно разделить все элементы на четыре группы:

1. Элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность системы (например, деформация кожуха, изменение окраски поверхности и т. п.).

2. Элементы, работоспособность которых за время эксплуатации практически не изменяется и вероятность безотказной работы близка к единице (корпусные детали, малонагруженные элементы с большим запасом прочности).

3. Элементы, ремонт или регулировка которых возможна при работе изделия или во время планового технического обслуживания (наладка или замена технологического инструмента оборудования и т. д.).

4. Элементы, отказ которых сам по себе или в сочетании с отказами других элементов приводит к отказу системы.

Для расчетов параметров надежности удобно использовать **структурно-логические схемы надежности ТС**, которые графически отображают взаимосвязь элементов и их влияние на работоспособность системы в целом.

Структурно-логическая схема представляет собой совокупность ранее выделенных элементов, соединенных друг с другом последовательно или параллельно. Критерием для определения вида соединения элементов (последовательного или параллельного) при построении схемы является влияние их отказа на работоспособность ТС.

В целом анализ структурной надежности ТС, как правило, включает следующие операции:

1. Анализ устройства и выполняемых системой и ее составными частями функций, а также взаимосвязь составных частей.

2. Формирование содержания понятия «безотказной работы» для данной конкретной системы.

3. Определение возможных отказов составных частей и системы, их причин и возможных последствий.

4. Оценка влияния отказов составных частей системы на ее работоспособность.

5. Разделение системы на элементы, показатели надежности которых известны.

6. Составление структурно - логической схема надежности технической системы, которая является моделью ее безотказной работы.

7. Составление расчётных зависимостей для определения показателей надёжности ТС с использованием данных по надежности её элементов и с учётом структурной схемы.

В зависимости от поставленной задачи на основании результатов расчета характеристик надежности ТС делаются выводы и принимаются решения о необходимости изменения или доработки элементной базы, резервировании отдельных элементов или узлов, об установлении определенного режима профилактического обслуживания, о номенклатуре и количестве запасных элементов для ремонта и т. д.

Такой метод (**метод прямого перебора**) практически универсален и может использоваться при расчете любых ТС.

Расчет мостиковых схем

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

Работоспособность такой системы определяется не только количеством отказавших элементов, но и их положением в структурной схеме.

Для расчета надежности мостиковых систем можно воспользоваться **методом прямого перебора**. Данный метод эффективен только при малом количестве элементов n .

Для анализа надежности ТС, структурные схемы которых не сводятся к параллельному или последовательному типу, можно воспользоваться также **методом логических схем с применением алгебры логики** (булевой

алгебры). Применение этого метода сводится к составлению для ТС формулы алгебры логики, которая определяет условие работоспособности системы.

При этом для каждого элемента и системы в целом рассматриваются два противоположных события – отказ и сохранение работоспособности.

Для составления логической схемы можно воспользоваться двумя методами – **минимальных путей и минимальных сечений**.

Минимальным путем называется последовательный набор работоспособных элементов системы, который обеспечивает ее работоспособность, а отказ любого из них приводит к ее отказу. Данный метод дает точное значение только для сравнительно простых систем с небольшим числом элементов. Для более сложных систем результат расчета является нижней границей вероятности безотказной работы.

Для расчета верхней границы вероятности безотказной работы системы служит **метод минимальных сечений**.

Минимальным сечением называется набор неработоспособных элементов, отказ которых приводит к отказу системы, а восстановление работоспособности любого из них – к восстановлению работоспособности системы.

Как и минимальных путей, минимальных сечений может быть несколько. Очевидно, система с параллельным соединением элементов имеет только одно минимальное сечение, включающее все ее элементы (восстановление любого восстановит работоспособность системы). В системе с последовательным соединением элементов число минимальных путей совпадает с числом элементов, и каждое сечение включает один из них.

Логическая схема системы составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального сечения были соединены друг с другом параллельно, а все минимальные сечения – последовательно.

Аналогично методу минимальных путей составляется функция алгебры логики.

В ряде случаев анализа надежности ТС удастся воспользоваться **методом разложения относительно особого элемента**, основанным на известной в математической логике теореме о разложении функции логики по любому аргументу.

Расчет комбинированных систем

Большинство реальных ТС имеет сложную комбинированную структуру, часть элементов которой образует последовательное соединение, другая часть – параллельное, отдельные ветви элементы или ветви структуры образуют мостиковые схемы или типа “ m из n ”.

Метод прямого перебора для таких систем оказывается практически не реализуем. Более целесообразно в этих случаях предварительно произвести декомпозицию системы, разбив ее на простые подсистемы – группы элементов, методика расчета надежности которых известна.

Затем эти подсистемы в структурной схеме надежности заменяются квазиэлементами с вероятностями безотказной работы, равными вычисленным вероятностям безотказной работы этих подсистем. При необходимости такую процедуру можно выполнить несколько раз, до тех пор, пока оставшиеся квазиэлементы не образуют структуру, методика расчета надежности которой известна.

Примеры решения задач

Пример 1.

Структурная схема надежности приведена на рисунке 5.1. Значения интенсивности отказов элементов: $\lambda_1 = 0,001 * 10^{-6}$ 1/ч; $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0,1 * 10^{-6}$ 1/ч; $\lambda_6 = \lambda_7 = 0,01 * 10^{-6}$ 1/ч; $\lambda_8 = \lambda_9 = \lambda_{10} = \lambda_{11} = 0,2 * 10^{-6}$ 1/ч; $\lambda_{12} = \lambda_{13} = \lambda_{14} = \lambda_{15} = 0,5 * 10^{-6}$ 1/ч.

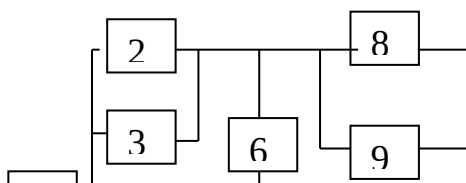


Рисунок 7.1 – Исходная схема системы

Последовательность расчета

1. В исходной схеме элементы 2 и 3 образуют параллельное соединение.

Заменяем их квазиэлементом А. Учитывая, что $P_2 = P_3$, получим

$$P_A = 1 - Q_2 * Q_3 = 1 - Q_2^2 = 1 - (1 - P_2)^2.$$

2. Элементы 4 и 5 также образуют параллельное соединение, заменив которое элементом В и учитывая, что $P_4 = P_5 = P_2$ получим

$$P_B = 1 - Q_4 * Q_5 = 1 - Q_2^2 = P_A.$$

3. Элементы 6 и 7 в исходной схеме соединены последовательно. Заменяем их элементом С, для которого, при $P_6 = P_7$

$$P_C = P_6 * P_7 = P_6^2.$$

4. Элементы 8 и 9 образуют параллельное соединение. Заменяем их элементом Д, для которого, при $P_8 = P_9$, получим

$$P_D = 1 - Q_8 * Q_9 = 1 - Q_8^2 = 1 - (1 - P_8)^2.$$

5. Элементы 10 и 11 с параллельным соединением заменяем элементом Е, причем, так как $P_{10} = P_{11} = P_8$, то

$$P_E = 1 - Q_{10} * Q_{11} = 1 - Q_{10}^2 = 1 - (1 - P_{10})^2 = P_D.$$

Преобразованная схема приведена на рисунке 5.2.

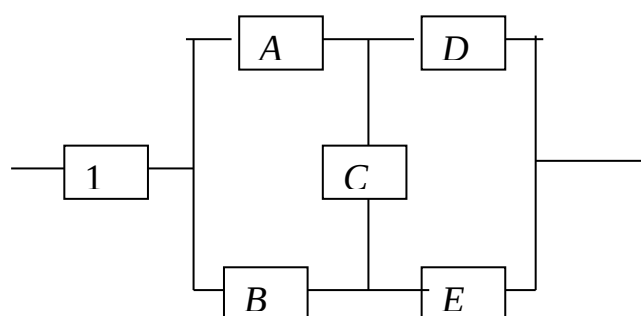


Рисунок 7.2 – Преобразованная схема

6. Элементы A, B, C, D и E образуют (рисунок 7.2) мостиковую систему, которую можно заменить квазиэлементом G . Для расчета вероятности безотказной работы воспользуемся методом разложения относительно особого элемента, в качестве которого выберем элемент C .

Тогда

$$P_G = P_C * P_G^* (P_C = 1) + Q_C * P_C^* (P_C = 0),$$

где $P_G^* (P_C = 1)$ - вероятность безотказной работы мостиковой схемы при абсолютно надежном элементе C (рисунок 8.3а);

$P_G^* (P_C = 0)$ - вероятность безотказной работы мостиковой схемы при отказавшем элементе C (рисунок 7.3 б).

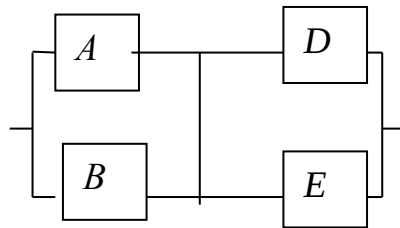


Рисунок 7.3 а - Преобразование мостиковой схемы при абсолютно надежном элементе C

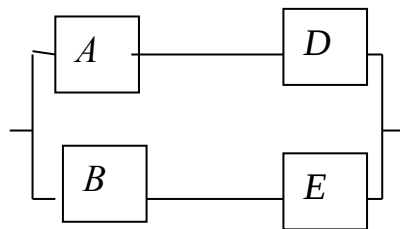


Рисунок 7.3 б - Преобразование мостиковой схемы при отказавшем элементе C

Учитывая, что $P_B = P_A$, получим

$$P_G = P_C * [1 - (1 - P_A) * (1 - P_B)] * [1 - (1 - P_D) * (1 - P_E)] + (1 - P_C) * [1 - (1 - P_A * P_B) * (1 - P_D * P_E)] = P_C * [1 - (1 - P_A)^2] * [1 - (1 - P_D)^2] + (1 - P_C) * [1 - (1 - P_A)^2] * [1 - (1 - P_D)^2]$$

$$P_D^2)] = P_C * (2 * P_A - P_A^2) * (2 * P_D - P_D^2) + (1 - P_C) * (P_A^2 + P_D^2 - P_A^2 * P_D^2) = P_A * P_C * P_D * (2 - P_A) * (2 - P_D) + (1 - P_C) * (P_A^2 + P_D^2 - P_A^2 * P_D^2).$$

6. Схема после преобразований изображена на рисунке 7.4.

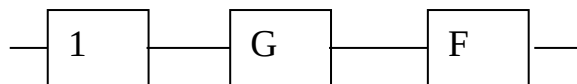


Рисунок 7.4 - Преобразованная схема

7. В преобразованной схеме (рисунок 5.4) элементы 1, G и F образуют последовательное соединение. Тогда вероятность безотказной работы всей системы

$$P = P_1 * P_G * P_F.$$

8. Так как по условию все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации, то вероятности безотказной работы элементов с 1 по 15 (рисунок 7.1) подчиняются экспоненциальному закону

$$P_i = e^{-\lambda_i t}.$$

9. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы элементов 1-15 исходной схемы по формуле из п. 8 для наработки до $3 * 10^{-6}$ часов представлены в таблице 7.1.

10. Результаты расчетов вероятностей безотказной работы квазиэлементов a, b, c, d, e, f и g по формулам также представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1- Расчет вероятности безотказной работы системы

Элемент	$\lambda_i, * 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Наработка $t, \times 10^6 \text{ ч}$							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,9	2,85
1	0,001	0,9995	0,9990	0,9985	0,9980	0,9975	0,9970	0,9981	0,9972
2 - 5	0,1	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408	0,8270	0,7520

6,7	0,01	0,9950	0,9900	0,9851	0,9802	0,9753	0,9704	0,9812	0,9719
8 – 11	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,6839	0,5655
12 – 15	0,5	0,7788	0,6065	0,4724	0,3679	0,2865	0,2231	0,3867	0,2405
<i>a, b</i>	-	0,9976	0,9909	0,9806	0,9671	0,9511	0,9328	0,9701	0,9385
<i>c</i>	-	0,9900	0,9801	0,9704	0,9608	0,9512	0,9417	0,9628	0,9446
<i>d, e</i>	-	0,9909	0,9671	0,9328	0,8913	0,8452	0,7964	0,9001	0,8112
<i>f</i>	-	0,9639	0,8282	0,6450	0,4687	0,3245	0,2172	0,5017	0,2458
<i>g</i>	-	0,9924	0,9888	0,9863	0,9820	0,9732	0,9583	0,9832	0,9594
<i>p</i>	-	0,9561	0,8181	0,6352	0,4593	0,3150	0,2075	0,4923	0,2352

Вопросы и задания

Вопросы.

1. Какие существуют методы расчета структурно-логических схем?
2. Какие существуют методы расчета мостиковых схем?
3. В чем сущность расчета методом минимальных сечений?
4. В чем сущность расчета методом минимальных путей?

Задания.

Задание №1. Определить вероятности безотказной работы системы при интенсивности отказов каждого элемента $\lambda_i = 5 \cdot 10^{-6}$ 1/ч для наработки 1000 часов для схемы, представленной на рисунке 7.5.

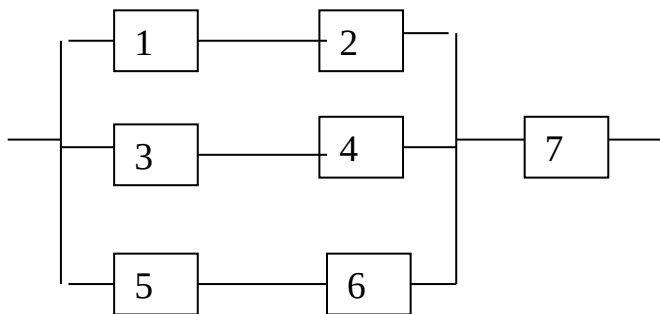


Рисунок 7.5 – Расчетная схема

Задание №2. Определить вероятности безотказной работы системы при интенсивности отказов каждого элемента $\lambda_i = 10^{-6}$ 1/ч для наработки 50000 часов для схемы, представленной на рисунке 7.6.

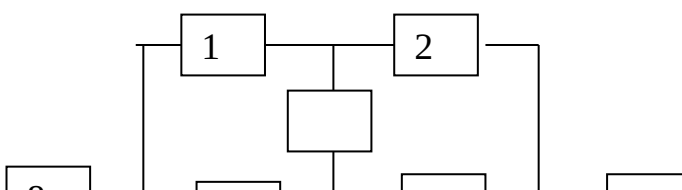


Рисунок 7.6 – Расчетная схема

Задание №3. Определить вероятности безотказной работы системы при интенсивности отказов каждого элемента $\lambda_i = 5 \cdot 10^{-6}$ 1/ч для наработки 10^5 часов для схемы, представленной на рисунке 7.7.

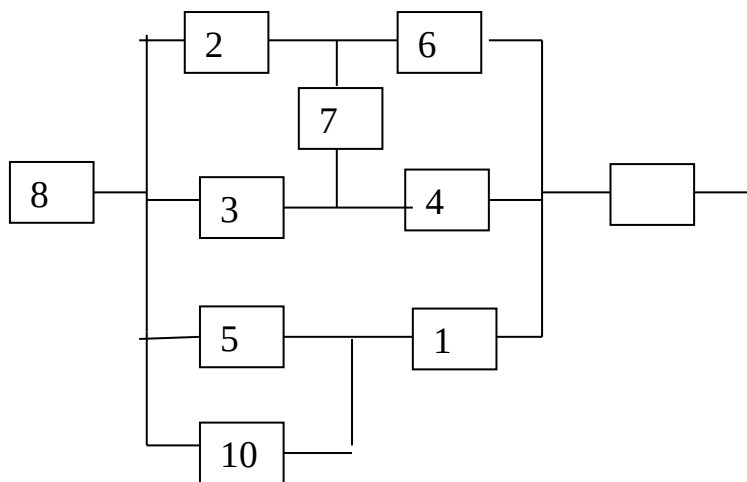


Рисунок 7.7 – Расчетная схема

Задание №4. Определить вероятности безотказной работы системы, представленной на рисунке 7.8, при вероятностях безотказной работы элементов $P_1(t)=0,9$; $P_2(t)=0,7$; $P_3(t)=0,6$; $P_4(t)=0,8$; $P_5(t)=0,5$; $P_6(t)=0,7$, используя метод разложения относительно особого элемента.

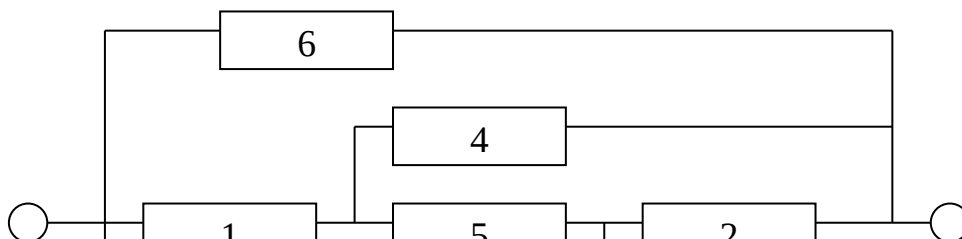


Рисунок 7.8. – Расчетная схема.

Задание №5. Определить вероятности безотказной работы системы, представленной на рисунке 7.9, при интенсивности отказов $\lambda_1(t)=0,9$; $\lambda_2(t)=0,8$; $\lambda_3(t)=0,7$; $\lambda_4(t)=0,5$; $\lambda_5(t)=0,6$; $\lambda_6(t)=0,8$.

Использовать метод разложения относительно особого элемента

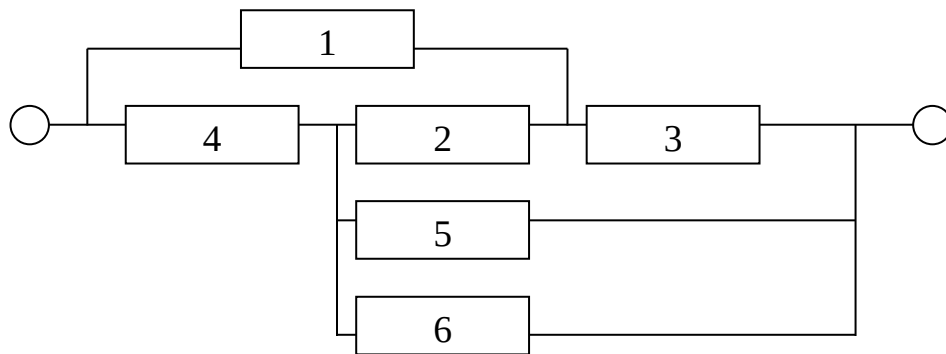


Рисунок 7.9 – Расчетная схема

Задание №6. Определить вероятности безотказной работы системы, представленной на рисунке 7.10, с помощью метода разложения относительно особого элемента.

Интенсивности отказов: $R_1(t)=0,9$; $R_2(t)=0,7$; $R_3(t)=0,6$; $R_4(t)=0,8$; $R_5(t)=0,5$; $R_6(t)=0,7$

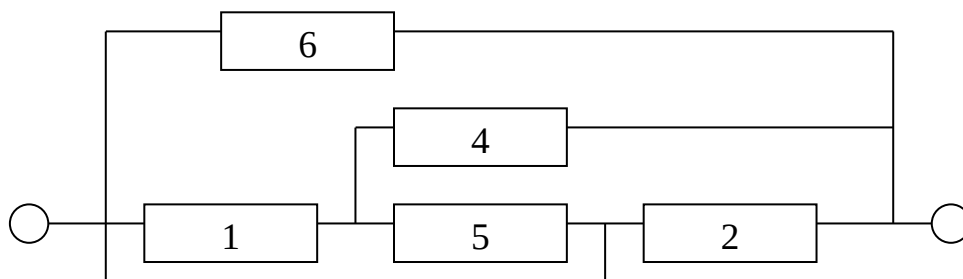


Рисунок 7.10 – Расчетная схема

Задание № 7. Определить вероятности безотказной работы системы, представленной на рисунке 7.11, с помощью метода разложения относительно особого элемента.

Интенсивности отказов: $R_1(t) = 0,9$; $R_2(t) = 0,7$; $R_3(t) = 0,6$; $R_4(t) = 0,8$; $R_5(t) = 0,5$; $R_6(t) = 0,7$

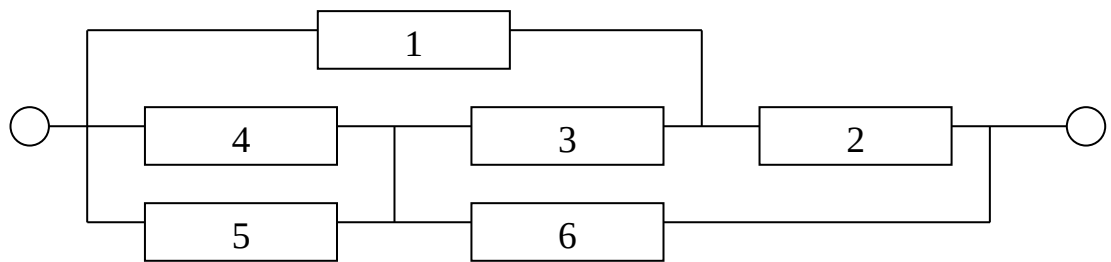
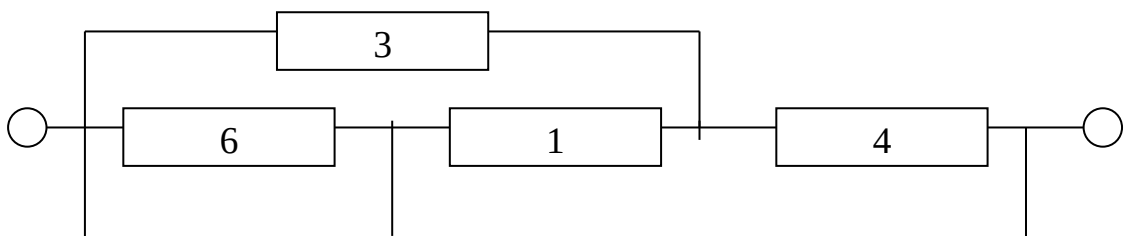


Рисунок 7.11 - Расчетная схема

Задание № 8. Определить вероятности безотказной работы системы, представленной на рисунке 7.12, с помощью метода разложения относительно особого элемента.

Интенсивности отказов: $R_1(t) = 0,9$; $R_2(t) = 0,8$; $R_3(t) = 0,5$; $R_4(t) = 0,7$; $R_5(t) = 0,6$; $R_6(t) = 0,8$



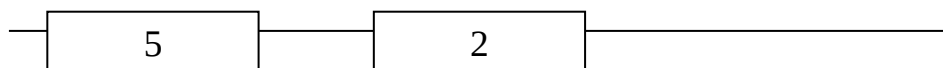


Рисунок 7.12 - Расчетная схема

Задание № 9. Определить вероятности безотказной работы системы, представленной на рисунке 7.13, с помощью метода разложения относительно особого элемента.

Интенсивности отказов: $R_1(t) = 0,7$; $R_2(t) = 0,7$; $R_3(t) = R_5(t) = 0,8$;
 $R_6(t) = R_4(t) = 0,9$

1. Схема соединения элементов системы по надежности имеет вид:

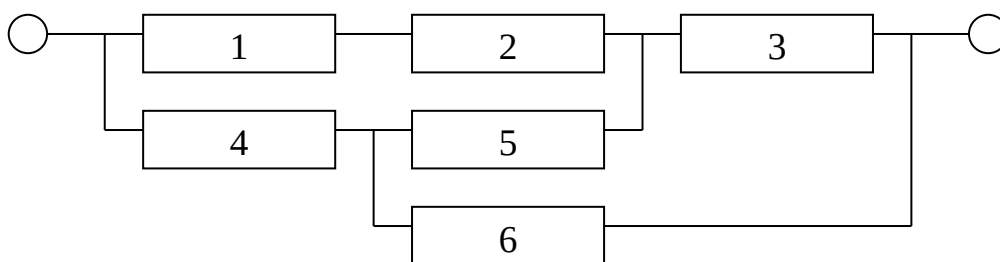


Рисунок 7.13 - Расчетная схема

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2012. – 368 с.

2. Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб.пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. – Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. – 275 с. : ил. – Библиогр.: с. 264-273

3. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб.пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – Санкт-Петербург

; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. – 313 с. : ил. ; 21. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 307-310. – ISBN 978-5-8114-1268-6

4. <http://www.tehdoc.ru/> - Интернет-проект Техдок.ру - Форум специалистов по охране труда.

5. <http://novtex.ru/bjd/> - Журнал «Безопасность жизнедеятельности».

6. <http://www.complexdoc.ru/> - База нормативных документов и технических стандартов.

Тема 8. Основы теории риска. Анализ риска. Нормативные значения риска. Снижение опасности риска.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 8

Тема занятия: «Расчет риска. Построение диаграммы Фармера»

Цель: уметь определять опасные, чрезвычайно опасные зоны, зоны приемлемого риска.

Актуальность темы. Умение определять опасные, чрезвычайно опасные зоны, зоны приемлемого риска - важный аспект оценки потенциального и техногенного риска поэтому знание указанных методик оценки актуально.

Теоретическая часть

Методические рекомендации к практическому занятию

Риск – вероятность экономического или финансового проигрыша, физического повреждения или причинения вреда в той либо форме из-за наличия неопределенности, связанной с желанием осуществить определенный вид действий.

Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать **индивидуальный, технический, экологический, социальный и экономический риски.**

Основные расчетные формулы

Индивидуальный риск (Ru), обусловленный вероятностью реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций.

$$Ru = \frac{P(t)}{L(f)}, \quad (8.1)$$

где $P(t)$ – число пострадавших (погибших) в единицу времени t от определенного фактора риска f ;

$L(f)$ – число людей, подверженных соответствующему фактору риска f в единицу времени t .

Индивидуальный риск (Ru), оцененный как ожидаемое значение ущерба U^* , причиненного чрезвычайным происшествием за интервал времени T и отнесенное к группе людей численностью M человек. Численность людей должна быть указана, если делается ссылка на индивидуальный риск.

$$Ru = U^*/(T * M). \quad (8.2)$$

Технический риск (Rm)

$$Rm = \frac{\Delta T(t)}{T(f)}, \quad (8.3)$$

где ΔT – число аварий в единицу времени t на идентичных технических системах и объектах;

T – число идентичных технических систем и объектов, подверженных общему фактору риска f .

Экологический риск (Ro)

$$Ro = \frac{\Delta O(t)}{O}, \quad (8.4)$$

где $P(t)$ – число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий в единицу времени t ;

ΔO – число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий в единицу времени t ;

O – число потенциальных источников экологических разрушений на рассматриваемой территории.

Масштабы экологического риска Ro^m

$$Ro^m = \frac{\Delta S}{S}, \quad (8.5)$$

где ΔS – площадь кризисной или катастрофической территории;

S – общая площадь биogeоценоза.

Социальный риск (R_c)

$$R_c = \frac{1000 * (C_2 - C_1)}{L}(t), \quad (8.6)$$

где C_1 – число умерших в единицу времени (смертность) в исследуемой группе в начале периода наблюдения, например, до развития чрезвычайных событий;

C_2 – смертность в то же группе людей в конце периода наблюдения, например, на стадии затухания чрезвычайной ситуации;

L – общая численность исследуемой группы.

Он определяется функцией, которая называется F/N -кривая или диаграмма Фармера.

Экономический риск ($R_{\text{э}}$)

$$R_{\text{э}} = \frac{B}{\Pi} * 100, \quad (8.7)$$

где B – вред обществу от рассматриваемого вида деятельности.

$$B = 3б + У,$$

где $3б$ – затраты на достижение данного уровня безопасности;

$У$ – ущерб, обусловленный недостаточной защищенностью человека и среды его обитания от опасностей;

Π – польза.

Для оценки эффекта поражения при ЧС выделяют два подхода: детерминированный и вероятностный.

Идеология вероятностного подхода в том, что одна и та же мера воздействия (количество поглощенного токсиканта, доза радиации, количество теплоты, избыточное давление ударной волны и т.п.) может вызвать последствия разной тяжести у различных людей, т.е. эффект поражения носит вероятностный характер.

Величина вероятности поражения (эффект поражения) P пор (измеряется в долях единицы или в процентах) выражается, как правило, функцией Гаусса (функцией ошибок)

Пробит-функция (Pr), отражает связь между вероятностью поражения P пор и дозой негативного воздействия D

$$Pr = a + b \ln D$$

где a и b – константы для каждого вещества или процесса, характеризующие специфику и меру опасности его воздействия.

Вероятность поражения человека тепловым излучением определяют по формуле:

$$P_r = -14,9 + 2,56 \ln (\tau q^{1,33})$$

Вероятность смертельного поражения тепловым излучением

$$P_r = -14,9 + 2,56 \ln (\tau q^{1,33})$$

Остальные формулы приведены в справочной литературе.

Примеры решения задач

Задача 1. Пусть некто A живет в небольшой деревне, насчитывающей 300 жителей. Статистические данные за 50 лет показывают, что за это время из числа жителей деревни 18 человек погибли и 200 человек пострадали и что численность населения за этот период времени почти не менялась. Житель A этой деревни 40 ч в неделю работает в близлежащем городе, на 4 недели в году выезжает из деревни на отдых, 2 недели каждый год проводит в командировках, а остальное время находится в деревне.

Определить:

- индивидуальный риск погибнуть для жителя A ;
- индивидуальный риск стать жертвой несчастного случая любой степени тяжести для жителя A .

Решение:

Исходные данные:

18 (чел.) – число погибших в деревне при горных обвалах за 50 лет;

200 (чел.) – число пострадавших при горных обвалах за 50 лет;

300 (чел.) – число жителей в деревне;

50 (лет) – период времени, за который известна статистика несчастных случаев;

52 (нед.) – число недель в году;

46 = 52-4-2 (нед.) – количество недель, проводимых жителем А в деревне;

168 = 24 * 7 (ч) – число часов в неделю;

128 = 168 - 40 (ч) – число часов в неделю, когда житель А подвержен опасности.

Индивидуальный риск погибнуть для жителя А

$$\frac{18 * 46 * 128}{50 * 300 * 52 * 168} = 8,1 * 10^{-4}.$$

Индивидуальный риск стать жертвой несчастного случая любой степени тяжести для жителя А

$$\frac{(18 + 200) * 46 * 128}{50 * 300 * 52 * 168} = 0,00979 = 9,8 * 10^{-3}.$$

Результаты расчета:

Индивидуальный риск погибнуть для жителя А – $8,1 * 10^{-4}$;

Индивидуальный риск стать жертвой несчастного случая любой степени тяжести для жителя А – $9,8 * 10^{-3}$.

В предлагаемых вычислениях используется одно предположение: индивидуальный риск одинаков для каждого жителя с равными факторами занятости, другими словами – область проживания достаточно мала.

На практике различают риск поражающего действия события в определенной точке пространства (в рассматриваемом примере риск определяется для соответствующего класса событий – горных обвалов, поражающих небольшую деревню; при этом значение этого риска равняется

$\frac{18}{50 * 300} = 12 * 10^{-4}$) и вероятность нахождения человека в этой же точке пространства (названную в примере фактором занятости и равную $\frac{46}{52} - \frac{128}{168} = 0,67$).

Такое разделение целесообразно, поскольку каждая из этих величин описывает независимые (с математической и физической точки зрения) явления.

В задаче расчет индивидуального риска был осуществлен только лишь в отношении горных обвалов. Не исключено, что жители деревни могут подвергаться также опасности схода снежных лавин или наводнений.

Общий индивидуальный риск (всех горных явлений), связанный с проживанием вблизи горного массива, может быть получен суммированием индивидуальных рисков, обусловленных всеми возможными причинами.

Задача 2. В предыдущем примере произошло 18 смертельных случаев в результате обвала в горах. Они могли произойти и в 9 обвалах, в каждом из которых было по две жертвы, и в одном обвале в горах, когда сразу погибли 18 человек.

Желательно [3], оценивать, помимо индивидуального риска, масштаб возможных катастроф. Для обозначения и выражения этого понятия всё больше закрепляется термин «социальный риск».

Имеющиеся статистические данные за 50 лет свидетельствуют о том, что в небольшой деревне при горных обвалах погибло 18 чел. Для рассматриваемого гипотетического примера 18 смертельных случаев, происшедших за 50 лет, предположим следующее их распределение (таблица 8.1).

Таблица 8.1 – Статистика смертельных случаев при горных обвалах

Дата происшествия	01.08.54	03.10.57	04.12.62	01.11.69	01.11.81	31.02.94
Число погибших	1	2	3	2	6	4

В таблице 6.2 те же данные представлены в виде, удобном для дальнейшего анализа.

Таблица 8.2 – Частота смертельных случаев и их распределение

Число погибших, N чел.	Частота событий, в которых погибло ровно	Частота событий (число случаев/год), в которых погибло ровно N человек	Число событий, в которых погибло не менее N человек	Частота событий (число случаев/год), в
--------------------------	--	--	---	--

	$N_{\text{человек}}$			которых погибло ровно $N_{\text{человек}}$
1	2	3	4	5
1	1	$1/50 = 0,02$	6	$6/50 = 0,12$
1	2	3	4	5
2	2	$2/50 = 0,04$	5	$5/50 = 0,1$
3	1	$1/50 = 0,02$	3	$3/50 = 0,06$
4	1	$1/50 = 0,02$	2	$2/50 = 0,04$
5	0	$0/50 = 0$	1	$1/50 = 0,02$
6	1	$1/50 = 0,02$	1	$1/50 = 0,02$

По данным таблицы 6.7 можно построить график с горизонтальной осью N – «число несчастных случаев» и вертикальной осью F – частота событий, в которых погибло не менее N человек» (рисунок 8.1).

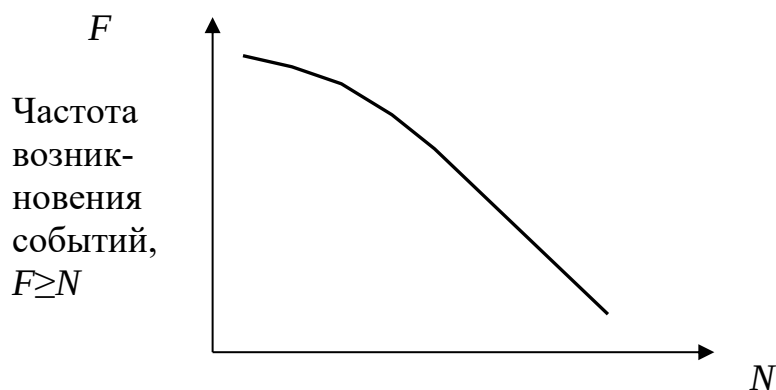


Рисунок 8.1 – Частота горных обвалов, в которых погибло не менее N человек

Если количество данных и диапазон их изменений велик, то F/N -диаграмма (кривая Фармера) строится в логарифмическом масштабе.

Они также могут быть аппроксимированы кривой – графиком непрерывной функции.

F/N -диаграммы применяются не только для сравнения опасностей АЭС, но и других явлений – как техносферы, так и сил природы [3].

F/N -диаграммы могут быть использованы для представления зависимости частоты реализации опасности от её масштаба.

В нашем примере под реализацией опасности можно понимать силу горного обвала, массу падающих камней, участвующих по оценке в данном событии.

Задача 3. Оценить аварийный риск на объекте, где за 20 лет произошло 4 аварии, если частота отказов в системе однотипных объектов соответствует дискретному распределению Пуассона

Решение:

При экспоненциальном распределении частота отказов в системе однотипных объектов соответствует дискретному распределению Пуассона

$$Q(N; \lambda \tau) = \frac{\lambda \tau}{N!} \exp(-\lambda \tau), \quad N = 0, 1, 2, 3 \dots \lambda \tau$$

За 20 лет 4 аварии

Среднее число аварий

$$\lambda = \frac{4}{20} = 0,2 \text{ лет}^{-1}$$

За 2 года две аварии могут произойти с вероятностью

$$Q(2; 0,2 * 2) = \frac{0,2 * 2}{2!} \exp(-0,4) = 0,054$$

Вероятность безаварийного функционирования за 2 года

$$Q(0; 0,2 * 2) = \frac{0,2 * 2}{0!} \exp(-0,4) = 0,67$$

Риск аварийных ситуаций за двухлетний период

$$1 - 0,67 = 0,33$$

Задача 4. Оценить вероятность взрыва в спиртовом цехе, расположенном в отдельном здании с неисправной молниезащитой, в котором установлено следующее оборудование: три реактора; насос; технологические трубопроводы общей длиной 50 м. Годовой фонд работы реактора и трубопроводов – 2000 ч/год. Годовой фонд работы насоса – 400 ч/год. Принять вероятность взрыва в помещении $0,012 \text{ год}^{-1}$. Принять следующие значения интенсивности отказов (ГОСТ 12.1.004-91): резервуары гидравлические –

0,00000027; насосы с машинным приводом – 0,000031; трубопроводы на 1 км длины – 0,0000049.

Решение:

Вероятность появления горючей смеси

Определим вероятность разгерметизации элементов технологической схемы

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

Резервуара:

$$P(t) = 1 - \exp(-2,7 * 10^{-7} * 2000) = 0.00054$$

Насоса:

$$P(t) = 1 - \exp(-3,1 * 10^{-5} * 400) = 0.033$$

Трубопроводов:

$$P(t) = 1 - \exp(-4,9 * 10^{-6} * 0,05 * 2000) = 0.0049$$

Разгерметизация каждого элемента независима

$$P_{раз} = 1 - \prod_{j=1}^5 (1 - P_j) = 1 - (1 - 0,0054)^3 * (1 - 0,033) * (1 - 0,0049) = 3,9 * 10^{-2}$$

Принимая вероятность наличия окислителя в воздухе равной 1, получим для вероятности взрыва соотношение

$$P_{вз} = P_{раз} * P_{из} = 3,9 * 10^{-2} * 0,0012 = 4,7 * 10^{-5} \text{ год}^{-1}$$

Задача 5. Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия в технической системе, состоящей из пяти подсистем с независимыми равновероятными отказами $P = 10^{-2}$.

Ожидаемые ущербы от отказов подсистем $U_1 = 5 * 10^6$, $U_2 = 10 * 10^6$, $U_3 = 20 * 10^6$, $U_4 = 15 * 10^6$, $U_5 = 25 * 10^6$.

Решение:

Рассчитаем степень риска

$$R_k = \sum_{i=1}^n Y_{ik} * P_{ik},$$

где $k = 1, 2$ – номер ЧС

$i = 1, 2, \dots, n$ – номер сценария для обеих ЧС.

ЧС №1

$$R_1 = \sum_{i=1}^n Y_i * P_i = 10^{-2} * (5 * 10^6 + 10 * 10^6 + 20 * 10^6 + 15 * 10^6 + 25 * 10^6) = 75 * 10^4 \text{ руб./год}$$

Задача 6. Количественно риск любой ЧС может быть определен параметром «степень риска», равным математическому ожиданию ущерба, который может быть нанесен в результате данной ЧС.

Прогнозируемый ущерб от двух различных ЧС составляет:

ЧС №1

Сценарий	№1	№2	№3
Ущерб U_i , тыс. руб	228,9	1157,0	130422,1
Вероятность реализации P_i , год ⁻¹	0,00004	0,0000052	0,00000078

ЧС №2

Сценарий	№1	№2	№3	№4
Ущерб U_i , тыс. руб	117,2	1356,62	2987,0	220057,4
Вероятность реализации P_i , год ⁻¹	0,000011	0,00000097	0,00000066	0,000000084

Предупреждение какой из ЧС является более приоритетным?

Решение:

Более приоритетной будет та чрезвычайная ситуация, у которой параметр «степень риска» больше.

Рассчитаем степень риска

$$R_k = \sum_{i=1}^n Y_{ik} * P_{ik},$$

где $k = 1, 2$ – номер ЧС

$i = 1, 2, \dots, n$ – номер сценария для обеих ЧС.

ЧС №1

$$R_1 = \sum_{i=1}^n Y_{i1} * P_{i1} = 2,29 * 10^5 * 4 * 10^{-5} + 1,16 * 10^6 * 5,2 * 10^{-6} + \\ + 1,3 * 10^8 * 7,9 * 10^{-7} = 9,16 + 6,0 + 102,7 = 117,86 \text{ руб./год}$$

ЧС №2

$$R_2 = \sum_{i=1}^n Y_{i2} * P_{i2} = 1,17 * 10^5 * 1,1 * 10^{-5} + 1,36 * 10^6 * 9,7 * 10^{-7} + \\ + 2,99 * 10^6 * 6,6 * 10^{-7} + 2,2 * 10^8 * 8,4 * 10^{-8} = \\ = 1,29 + 1,32 + 1,97 + 18,48 = 23,06 \text{ руб./год}$$

Следовательно, ЧС №1 представляет большую угрозу и ее следует предотвращать в первую очередь.

Задача 7. На складе взрывчатых веществ находится октоген 50000 кг. На расстоянии 500 м от него расположен населенный пункт. Избыточное давление на этом расстоянии при гипотетической аварии (взрыв всей массы октогена) составит 10,8 кПа. Импульс фазы сжатия 29 кПа*с. Определить вероятность разрушения зданий в населенном пункте.

Решение:

В соответствии с вероятностным подходом, определим Pr-функцию для слабых разрушений зданий (справочные данные)

$$Pr = 5 - 0,26 \ln \left[\left(\frac{4,6}{\Delta P \phi} \right)^{3,9} + \left(\frac{0,11}{I_+} \right)^{5,0} \right],$$

где $\Delta P \phi$ – избыточное давление в расчетной точке, кПа

I_+ - импульс фазы сжатия ударной волны, кПа*с

$$Pr = 5 - 0,26 \ln \left[\left(\frac{4,6}{10,8} \right)^{3,9} + \left(\frac{0,11}{29} \right)^{5,0} \right] = 5,9$$

По справочной таблице (Приложение Д. Значения условной вероятности поражения в зависимости от Pr) условная вероятность слабых разрушений – 82%

Pr-функция для средних разрушений зданий (справочные данные)

$$Pr = 5 - 0,26 \ln \left[\left(\frac{17,5}{\Delta P \phi} \right)^{8,4} + \left(\frac{0,29}{I_+} \right)^{9,3} \right]$$

$$Pr = 5 - 0,26 \ln \left[\left(\frac{17,5}{10,8} \right)^{8,4} + \left(\frac{0,29}{29} \right)^{9,3} \right] = 3,9$$

В соответствии со справочными данными такая величина соответствует условной вероятности средних разрушений 13%.

Pr-функция для сильных разрушений зданий (справочные данные)

$$Pr = 5 - 0,22 \ln \left[\left(\frac{40}{\Delta P \phi} \right)^{7,4} + \left(\frac{0,26}{I_+} \right)^{11,3} \right]$$

$$Pr = 5 - 0,22 \ln \left[\left(\frac{40}{10,8} \right)^{7,4} + \left(\frac{0,26}{29} \right)^{11,3} \right] = 2,9$$

В соответствии со справочными данными условная вероятность сильных разрушений 2%.

Задача 9. Оцените ожидаемое число погибших при аварии автопропановоза с образованием «огненного шара». На расстоянии 50 м от него находится автобус с 50 пассажирами. На этом расстоянии интенсивность теплового излучения составит 71,8 кВт/м², продолжительность существования «огненного шара» – 12 с.

Решение

В соответствии с вероятностным подходом, определим *Pr*-функцию условного поражения человека тепловым излучением (справочные данные) (извлечение из ГОСТ 12.3.047-98)

$$Pr = -14,9 + 2,56 \ln(ts * q^{1,33}),$$

где t_s – эффективное время экспозиции, с;

q – интенсивность теплового излучения, кВт/м².

$$Pr = -14,9 + 2,56 \ln(12 * 71,8^{1,33}) = 6,01$$

По справочной таблице (Приложение Д) условная вероятность поражения человека $\approx 85\%$

Определим количество пострадавших людей

$$50 * 0,85 = 42,5 \text{ (принимаем 43 человека)}$$

Вопросы и задания.

Вопросы.

1. Какова величина приемлемого риска?
2. Какие существуют виды риска?
3. Какие существуют нормативные виды риска?
4. Приведите определение и расчетные формулы индивидуального риска.
5. Приведите определения и расчетные формулы социального риска.
6. Приведите определения и расчетные формулы коллективного риска.
7. Приведите определения и расчетные формулы, экономического риска.
8. Приведите определения и расчетные формулы экологического риска,
9. Приведите определения и расчетные формулы технического риска
10. Опишите особенности построения диаграммы Фармера.

Задания

Задание №1. Ежедневно в дорожно-транспортных происшествиях в среднем погибает 95 человек.

Определить риск фатального исхода в год, обусловленный этими происшествиями, если все население составляет 120 млн чел.

Задание №2. Найти вероятную численность фатальных исходов в год, если принять риск, равным приемлемому для условий задачи №1.

Задание №3. Определить число людей, погибающих ежегодно на земном шаре от всех опасностей, если общий риск принять равным $5 \cdot 10^{-5}$. Численность людей 5,5 млрд чел.

Задание №4. Оцените социальный риск по статистике пострадавших в несчастных случаях на предприятии за 50 лет (таблица 8.3).

Таблица 8.3 – Исходные данные (число пострадавших)

Номер варианта	Дата несчастного случая (Д 2 – позже Д 1, Д 3 позже Д 2 и т.д.)						
	Д 1	Д 2	Д 3	Д 4	Д 5	Д 6	Д 7
1	13	12	21	38	21	13	2
2	2	4	2	6	5	8	7
3	11	11	4	2	6	6	9
4	8	7	8	6	13	2	13
5	4	14	8	5	5	8	3
6	2	12	4	2	8	4	6
7	6	3	4	3	6	3	5
8	8	3	5	3	3	8	9
9	6	2	2	5	5	4	9
0	3	3	7	2	8	2	12

Порядок решения задачи

1. Упорядочить по возрастанию число пострадавших N и определить частоту событий F , в которых пострадало не менее N человек.
2. Результаты расчетов занести в таблицу 6.4 (где $N_1 < N_2 < \dots < N_{max}$).
3. Построить F/N -диаграмму, в которой на горизонтальной оси - число пострадавших $N_1, N_2, \dots, N_{max}$ (по исходным данным), а по вертикальной оси – частоты событий $F_1, F_2, \dots, F_{min}$, полученные при статистической обработке исходных данных.

Таблица 8.4 – Пример таблицы для статистической обработки данных

Число пострадавших N чел.	Число событий, в которых пострадало N чел.	Частота событий, в которых пострадало N чел.	Число событий, в которых пострадало не менее N чел	Частота событий F , в которых пострадало не менее N чел.
N_1				F_1
N_2				F_2
...				
N_{max}				F_{min}

Задание №5. Оценить вероятность взрыва в цехе, в котором возможно возникновение условий для горения и установлено следующее оборудование:

- реактор;
- насос;
- технологические трубопроводы общей длиной 100 м.

Годовой фонд работы реактора и трубопроводов – A , ч/год.

Годовой фонд работы насоса – B , ч/год.

Принять вероятность взрыва в помещении $0,005 \text{ год}^{-1}$.

Таблица 8.4 – Исходные данные для расчетов

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1000	1500	2000	1800	1700	2100	2500	2700	2300
B	300	400	600	400	500	400	500	400	300

Задание №6. Оценить аварийный риск на объекте по исходным данным, представленным в таблице 8.5. Представить графическую интерпретацию расчетов за период 1 – 7 лет следующих показателей: отсутствие аварий; 1 авария; 2 аварии; 3 аварии.

Определить вероятность отсутствия аварий за 1, 5, 10 лет

Таблица 8.5 – Исходные данные для расчетов

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Период времени, лет	10	15	20	18	17	20	25	27	23
Число аварий	3	4	6	4	5	4	5	4	3

Задание №7. Определить риск гибели человека от экологических заболеваний, если известно, что от экологических заболеваний на планете умирает 1,6 млн человек при общей численности населения 6,4 млрд человек.

Задание №8. Определить риск гибели человека на производстве в год в мире, если известно, что ежегодно в мире погибает 250000 человек, число работающих на производстве 2,4 млрд человек.

Задание №9. Оценить риск повреждения агрегата в течение недели при его функционировании 3 часа в сутки, средней скорости износа 0,021/час. Определить снижение риска повреждения агрегата, если время работы агрегата уменьшится на 1 час.

Задание № 10. Количественно риск любой ЧС может быть определен параметром «степень риска», равным математическому ожиданию ущерба, который может быть нанесен в результате данной ЧС.

Прогнозируемый ущерб от двух различных ЧС составляет:

Таблица 8.5 - ЧС №1

Сценарий	№1	№2	№3
Ущерб U_i , тыс. руб	200,1	1110,0	130200,1
Вероятность реализации P_i , год ⁻¹	0,00004	0,0000052	0,00000078

Таблица 8.6 - ЧС №2

Сценарий	№1	№2	№3	№4
Ущерб U_i , тыс. руб	100,2	1300,62	2900,0	220000,4
Вероятность реализации P_i , год ⁻¹	0,000011	0,00000097	0,00000066	0,000000084

Предупреждение какой из ЧС является более приоритетным?

Задание № 11. Оцените ожидаемое число погибших при аварии автопропановоза с образованием «огненного шара». На расстоянии 50 м от него находится автобус с 70 пассажирами. На этом расстоянии интенсивность теплового излучения 110,7 кВт/м², продолжительность существования огненного шара 15 с.

Задание № 12. Оцените социальный риск по статистике пострадавших в несчастных случаях на предприятии за 70 лет (таблица).

Таблица 8.7 - Исходные данные (число пострадавших)

Дата несчастного случая (Д2- позже Д1, Д3-позже Д2 и т.д.)						
Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6	Д7
6	7	8	3	6	2	5

Указания к решению задачи

1. Упорядочить по возрастанию число пострадавших N и определить частоту событий F , в которых пострадало не менее N человек.
2. Результаты расчетов занести в таблицу 2 (где $N_1 < N_2 < \dots < N_{\max}$).
3. Построить , в которой на горизонтальной оси – число пострадавших $N_1, N_2, \dots, N_{\max}$ (по исходным данным), а по вертикальной оси - частоты событий $F_1, F_2, \dots, F_{\min}$, полученные при статистической обработке исходных данных.

Задание № 13. Определить индивидуальный риск гибели и риск травмирования людей, проживающих в горной местности от обвалов. Человек живет в деревне, в которой проживает 500 жителей. За 50 лет от обвалов погибло 30 человек , пострадали 150 человек. Численность населения за этот период практически не изменилась. Жители еженедельно 40 ч в неделю работают в близлежащем городе. На 4 недели в году выезжают на отдых, 2 недели каждый год проводят в командировках, а остальное время находятся в деревне.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2012. – 368 с.

2. Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. – Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. – 275 с. : ил. – Библиогр.: с. 264-273

3. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб. пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. – 313 с. : ил. ; 21. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 307-310. – ISBN 978-5-8114-1268-6

4. <http://www.tehdoc.ru/> - Интернет-проект Техдок.ру - Форум специалистов по охране труда.

5. <http://novtex.ru/bjd/> - Журнал «Безопасность жизнедеятельности».

6. <http://www.complexdoc.ru/> - База нормативных документов и технических стандартов.

Тема 9. Классификация моделей риска на основе Марковских цепей

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 9

Тема занятия: «Марковские процессы в технических системах. Построение и расчет графов состояний»

Цель работы: сформировать способность оценивать риск и определять меры по обеспечению безопасности разрабатываемой техники

Актуальность темы. Умение применять математические модели, базирующиеся на марковских процессах - важный элемент оценки риска опасных ситуаций.

Теоретическая часть

Методические рекомендации к практическому занятию

Случайный процесс называется процессом с дискретным во времени, если переходы системы из состояния в состояние возможны только в строго определенных, заранее фиксированные моменты времени: $t_1, t_2, \dots$

В промежутки времени между этими моментами система S сохраняет свое состояние. Случайный процесс называется процессом с непрерывным временем, если переход системы из состояния в состояние возможен в любой, наперед неизвестный, случайный момент t .

Рассмотрим прежде всего марковский случайный процесс с дискретными состояниями и дискретным временем.

Пусть имеется физическая система S , которая может находиться в состояниях: $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, причем переходы («перескоки») системы из состояния в состояние возможны только в моменты:

$$t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$$

Будем называть эти моменты «шагами» или «этапами» процесса и рассматривать случайный процесс, происходящий в системе S , как функцию целочисленного аргумента: $1, 2, \dots, k, \dots$ (номера шага).

Случайный процесс, происходящий в системе, состоит в том, что в последовательные моменты времени $t_1, t_2, t_3, \dots$ система S оказывается в тех или других состояниях, ведя себя, например, следующим образом:

$$S1 \rightarrow S3 \rightarrow S5 \rightarrow S4 \rightarrow S2 \rightarrow S1 \rightarrow \dots$$

или же:

$$S1 \rightarrow S2 \rightarrow S1 \rightarrow S2 \rightarrow S3 \rightarrow S4 \rightarrow S1 \rightarrow \dots$$

В общем случае в моменты $t_1, t_2, \dots$ система может не только менять состояние, но и оставаться в прежнем, например:

$$S1 \rightarrow S1 \rightarrow S2 \rightarrow S3 \rightarrow S3 \rightarrow S3 \rightarrow S4 \rightarrow S1 \rightarrow \dots$$

Условимся обозначать $S_i(k)$ событие, состоящее в том, что после k шагов система находится в состоянии S_i . При любом k события

$$S_1(k), S_2(k), \dots, S_i(k), \dots, S_n(k)$$

образуют полную группу и несовместны.

Процесс, происходящий в системе, можно представить как последовательность (цепочку) событий, например:

$$S_1(0), S_2(1), S_1(2), S_2(3), \dots$$

Такая случайная последовательность событий называется марковской цепью, если для каждого шага вероятность перехода из любого состояния S_i в любое S_j не зависит от того, когда и как система пришла в состояние S_i .

Мы будем описывать марковскую цепь с помощью так называемых вероятностей состояний. Пусть в любой момент времени (после любого, k -го шага) система S может быть в одном из состояний:

$$S_1, S_2, \dots, S_n,$$

т.е. осуществится одно из полной группы несовместных событий:

$$S_1(k), S_2(k), \dots, S_n(k).$$

Обозначим вероятности этих событий:

$$p_1(1) = P(S_1(1)); p_2(1) = P(S_2(1)); \dots; p_n(1) = P(S_n(1))$$

– вероятности после первого шага;

$$p1(2) = P(S1(2)); p2(2) = P(S2(2)); \dots; pn(2) = P(Sn(2));$$

– вероятности после второго шага;

и вообще после k -го шага:

$$p1(k) = P(S1(k)); p2(k) = P(S2(k)); \dots; pn(k) = P(Sn(k)).$$

Легко видеть, что для каждого номера шага k

$$p1(k) + p2(k) + \dots + pn(k) = 1,$$

так как это вероятности несовместных событий, образующих полную группу.

Будем называть вероятности

$$p1(k), p2(k), \dots, pn(k)$$

Для решения задач по Марковским процессам широко используется теория матриц, приведем некоторые важные понятия, необходимые для усвоения очень хорошей книги О. С. Андросенко, содержащей краткий теоретический материал и контрольные задания по марковским цепям с дискретным и непрерывным временем. Указания содержат необходимые инструкции для решения задач с применением общедоступных пакетов программ *WinQSB* и *MathCAD*.

Неотрицательная матрица (НМ) – прямоугольная таблица с неотрицательными элементами, взятыми из множества действительных чисел.

Стохастическая матрица (СМ) – это НМ, у которой сумма элементов каждой ее строки равна 1.

Цепь Маркова (ЦМ) – строчная матрица, составленная из марковских элементов, взятых из множества действительных чисел: ЦМ возникает повторением марковских элементов, или, что то же. условных вероятностей. Их называют вероятностями перехода некоторой дискретной последовательности случайных величин $\theta_0 \rightarrow \theta_1 \rightarrow \theta_2 \rightarrow \theta_3 \rightarrow \dots \rightarrow \theta_\mu \rightarrow \dots \rightarrow \theta_{n-1}$ в состояние θ_n в дискретные моменты времени, обозначаемые чаще всего как π_n ($\theta_n | \theta_{n-1} = \pi_n(\theta_n | \theta_0, \theta_1, \dots, \theta_\mu, \dots, \theta_{n-1})$), которые образуют простую ЦМ из множества действительных чисел.

Марковский элемент (марковское свойство) = условная вероятность = переходная вероятность = одношаговая вероятность, ..., m -шаговая вероятность.

Граф размеченный (ГР) — графическое состояние стохастической системы, отображаемое графом ее состояний (ГС): на ГС кружочками или прямоугольниками обозначают состояния системы, а стрелками — возможные ее переходы из одного состояния в другое (непосредственно, а не через некое иное состояние). Число состояний может быть как конечным, так и бесконечным, но счетным.

Матрицы соответствующие – матрицы, при умножении которых соблюдается соотношение их порядков «множимого» и «множителя»¹, т.е. число столбцов (p) первой матрицы равно числу строк (p) второй матрицы: $[m, p] \cdot [p, m] = [m, m]$ (порядок матрицы определяется количеством строк и столбцов в прямоугольной таблице).

Примеры решения задач

Задача 1.

Задана матрица $\pi_1 = \begin{pmatrix} 0,7 & 0,3 \\ 0,6 & 0,4 \end{pmatrix}$ вероятностей перехода дискретной цепи Маркова из i -го состояния в j -е за один шаг ($i, j = 1, 2$). Распределение вероятностей по состояниям в начальный момент $t = 0$ определяется вектором (матрицей-строкой) $q = (0,1 \ 0,9)$. Требуется найти: 1) матрицу финальной вероятности P_2 перехода цепи из состояния i в состояние j за два шага; 2) матрицу финальной вероятности P_1 , перехода цепи из состояния I в состояние j за один шаг.

Решение

В случае однородности дискретной цепи Маркова для нее справедливо соотношение $\pi_n = \pi_1^n$, где π_j – матрица переходных

вероятностей за один шаг; π_n — матрица переходных вероятностей за n шагов: для $n = 2$ вычислим произведение матриц:

$$\pi_2 = \pi_j^n = \begin{pmatrix} 0,7 & 0,3 \\ 0,6 & 0,4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,7 & 0,3 \\ 0,6 & 0,4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,67 & 0,33 \\ 0,66 & 0,34 \end{pmatrix}$$

Найдем матрицу P_1 за один шаг:

$$P_1 = q\pi_1 = \begin{pmatrix} 0,1 & 0,9 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,7 & 0,3 \\ 0,6 & 0,4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,61 & 0,39 \end{pmatrix}$$

Пример 2. Имеется матрица интенсивностей переходов непрерывной цепи Маркова $A = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 2 & -3 & 1 \\ 4 & 0 & -4 \end{pmatrix}$. Требуется составить размеченный граф состояний, соответствующий матрице A , и систему дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний, найти предельное распределение вероятностей.

Решение:

Однородная цепь Маркова с конечным числом состояний $A_1, A_2, \dots, A_k$ характеризуется матрицей интенсивностей переходов

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda^{11} & \lambda^{12} & \dots & \lambda^{1k} \\ \lambda^{21} & \lambda^{22} & \dots & \lambda^{2k} \\ \lambda^{k1} & \lambda^{k2} & \dots & \lambda^{kk} \end{pmatrix}.$$

где $\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}$ – интенсивность перехода цепи Маркова из состояния A_i в состояние A_j ; $p_{ij}(\Delta t)$ – вероятность перехода $A_i \rightarrow A_j$ за интервал времени Δt .

Переходы системы из состояния в состояние удобно задавать с помощью размеченного графа состояний, на котором отмечаются дуги, соответствующие интенсивностям $\lambda_{ij} > 0$.

Составим размеченный граф состояний для заданной матрицы интенсивностей переходов (рисунок. 9.1). Пусть $\bar{p}(t) = (p_1(\Delta t), p_2(\Delta t), \dots, p_k(\Delta t))$ – вектор вероятностей $p_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, k$, нахождения системы в состоянии A_j в момент t .

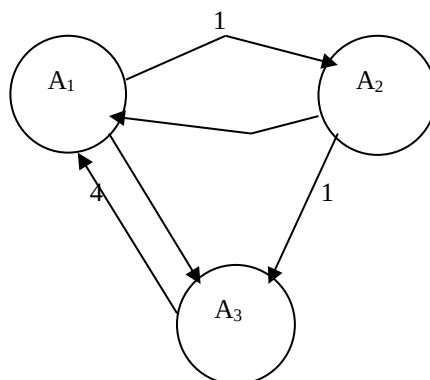


Рисунок 9.1 – Размеченный граф состояний

Очевидно, что $0 \leq p_j(t) \leq 1$ и $\bar{p}'_1(t), \bar{p}'_2(t), \dots, \bar{p}'_k(t)$. Вероятности $p_j(t)$ удовлетворяют системе дифференциальных уравнений Колмогорова на базе марковских цепей (СДУМК), которая в матричной форме имеет вид:

$$\bar{p}'(t) = \bar{p}(t) \wedge \quad (9.1)$$

Если в начальный момент система находилась в состоянии A_j то СДУМК следует решать при начальных условиях

$$p_i(0) = 1, p_j(0) = 0, j \neq i, j = 1, 2, \dots, k/ \quad (9.2)$$

Совокупность СДУМК (9.1) и начальных условий (9.2) однозначно описывает однородную цепь Маркова с непрерывным временем и конечным числом состояний.

Составим СДУМК для заданной цепи Маркова. Поскольку $k = 3$. то $j = 1, 2, 3$. Из соотношения (9.1) получим

$$(p_1'(t), p_2'(t), p_3'(t)) = (p_1(t), p_2(t), p_3(t)) \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 2 & -3 & 1 \\ 4 & 0 & -4 \end{pmatrix}.$$

Отсюда имеем систему

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1'(t) = -2p_1(t) + 2p_2(t) + 4p_3(t), \\ p_2'(t) = p_1(t) - 3p_2(t), \\ p_3'(t) = p_1(t) + p_2(t) - 4p_3(t), \\ p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = 1. \end{array} \right.$$

Последнее условие называется нормировочным.

Распределение вероятностей по состояниям называется *стационарным*, если оно меняется с течением времени, т.е. $\bar{p}'(t) = \bar{p}' = \bar{0}$.

Тогда из СДУМК (9.1) получаем систему для нахождения стационарного распределения $\bar{p}\Lambda=\bar{0}$, где $\sum_{j=1}^k p_j = 1, 0 \leq p_j \leq 1$.

Для данного примера из МСДУК получим

$$\left\{ \begin{array}{l} -2p_1 + 2p_2 + 4p_3 = 0, \\ p_1 - 3p_2 = 0, \\ p_1 + p_2 - 4p_3 = 0, \\ p_1 + p_2 + p_3 = 1 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} p_1 = 3p_2, \\ p_2 = p_3. \end{array} \right.$$

С учетом нормировочного условия $3p_2 + p_2 + p_2 = 1$ найдем $p_2 = \frac{1}{5}$, $p_1 = \frac{3}{5}$, $p_3 = \frac{1}{5}$.

Следовательно, предельное распределение имеет вид $p = \left(\frac{3}{5}; \frac{1}{5}; \frac{1}{5}\right)$.

Отметим, что этот результат может быть получен непосредственно по размеченному графу состояний. Для этого надо воспользоваться правилом: для стационарного распределения сумма произведений λ_j, p_i , $j \neq i$ для стрелок, выходящих из i -го состояния, равна сумме произведений λ_j, p_i , $j \neq i$ для стрелок, входящих в i -е состояние.

$$\text{Действительно, } \left\{ \begin{array}{l} A1: 2p_2 + 4p_3 = p_1 + p_1 \\ A2: p_1 = 2p_2 + p_2 \\ A3: p_1 + p_2 = 4p_3 \\ p_1 + p_2 + p_3 = 1 \\ 0 \leq p_j \leq 1 \forall j = 1, 2, 3 \\ A1: 2p_2 \end{array} \right.$$

Выходит, что полученная система эквивалентна той, которая составлена по МСДУК. Следовательно, она имеет такое же решение.

Ответ: стационарное распределение имеет вид $p = \left(\frac{3}{5}; \frac{1}{5}; \frac{1}{5}\right)$.

Задача 2. В определенные моменты времени не ЭВМ осматриваются, в результате чего каждая признается либо исправной и продолжает работать, либо неисправной и направляется в ремонт. Вероятность того, что исправная ЭВМ выйдет из строя, равна q . Вероятность того, что неисправная ЭВМ будет приведена в исправное

состояние. т.е. восстановлена, равна r . Процессы выхода ЭВМ на строя и их восстановления протекают независимо друг от друга. Размеченный граф состояний ВЦ имеет вид, показанный на рисунке 9.2.

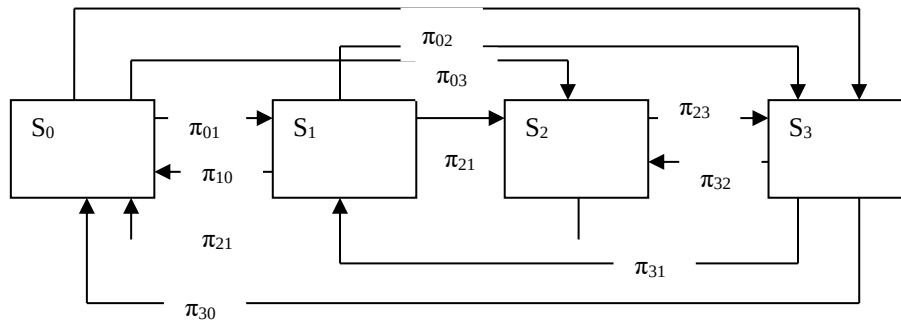


Рисунок 9.2 - Размеченный граф состояний ВЦ

На рисунке 9.2 обозначены следующие состояния ВЦ: s_0 – все три ЭВМ исправны; s_1 – одна ЭВМ неисправна, остальные две работают; s_2 – две ЭВМ неисправны, одна работает; s_3 – все три ЭВМ неисправны.

Стрелки на рисунок. 9.2, которые идут слева направо, отображают прямое движение потока вероятностей - это вероятности перехода π_{0j} системы из состояния S_0 в состояние S_j . Эти вероятности находятся согласно биномиальному распределению:

$$\sum_{i=0}^3 C_3^i q^i (1-q)^{3-i} = \sum_{i=0}^3 \pi_{0i} = 1.$$

Возвратные вероятности восстановления ВЦ отображаются симметричной формулой

$$\sum_{i=0}^3 C_3^i r^i (1-r)^{3-i} = \sum_{i=0}^3 \pi_{0i} = 1.$$

Формулы, аналогичные приведенным, используются для получения системы уравнений переходных вероятностей π_{ij} и π_{ji} . После решения системы уравнений находятся численные значения финальных вероятностей состояний ВЦ: $p_0 = 0,216, p_1 = 0,432, p_2 = 0,288, p_3 = 0,064$ при $r=0,3; q=0,2$.

Вопросы и задания.**Вопросы.**

1. В чем особенность описания марковских процессов?
2. В чем сущность матрицы вероятности переходов?
3. Какие процессы отражает граф состояний

Задания.

Задание № 1. Невосстанавливаемая система может находиться в одном из 4-х состояний, для которых известны:

- начальный вектор $P_0 = \{0,6;0,4;0;0\}$;
- матрица вероятностей переходов;
- вероятность отказа $P_F(t) = 0,22$

$$P_{ij}(t) = \begin{pmatrix} 0,30 & 0,40 & 0,20 & - \\ 0,30 & 0,30 & - & - \\ 0,20 & 0,47 & 0,30 & - \\ - & - & - & 1 \end{pmatrix}$$

Определить:

- неизвестные элементы матрицы $P_{ij}(t)$;
- вероятность безотказной работы $R(t)$;
- изобразить граф состояний.

Задание № 2 Техническая система может находиться в одном из 4-х состояний, для которых известны:

- начальный вектор $P_0 = \{0,3;0,7;0;0\}$;
- матрица вероятностей переходов;

$$P_{ij}(t) = \begin{pmatrix} - & 0,30 & 0,20 & 0,10 \\ 0,45 & - & 0,20 & 0,05 \\ 0,20 & 0,47 & - & 0,03 \\ 0 & 0 & 0 & - \end{pmatrix}$$

Определить:

- неизвестные элементы матрицы $P_{ij}(t)$;
- $R(t)$; $Q(t)$
- изобразить граф состояний.

Задание № 3. Невосстанавливаемая система может находиться в одном из 4-х состояний, для которых известны:

- начальный вектор $P_0 = \{0,4; 0,6; 0; 0\}$;
- матрица вероятностей переходов;
- вероятность отказа $P_f(t) = 0,22$

$$P_{ij}(t) = \begin{pmatrix} 0,30 & 0,40 & 0,20 & - \\ 0,30 & 0,30 & - & - \\ 0,20 & 0,47 & 0,30 & - \\ - & - & - & - \end{pmatrix}$$

Определить:

- неизвестные элементы матрицы $P_{ij}(t)$;
- вероятность безотказной работы $R(t)$;
- изобразить граф состояний.

Задание № 4. В начальный момент времени система может находиться в состоянии 1 или 2, для которых известны:

- матрица вероятностей переходов;
- вероятность отказа $P_f(t) = 0,07$

$$P_{ij}(t) = \begin{pmatrix} - & 0,30 & 0,20 & 0,10 \\ 0,45 & 0,30 & 0,20 & - \\ 0,20 & - & 0,30 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Определить:

- неизвестные элементы матрицы P_0 ;
- вероятность безотказной работы $P_{ij}(t)$;
- изобразить граф состояний.

Задание № 5. Техническая система может находиться в одном из 4-х состояний, для которых известны:

- начальный вектор $P_0 = \{1;0;0;0\}$;
- матрица вероятностей переходов;

$$P_{ij}(t) = \begin{pmatrix} 0,40 & 0,30 & 0,20 & - \\ 0,45 & - & 0,20 & 0,05 \\ 0,20 & - & 0,30 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Определить:

- неизвестные элементы матрицы $P_{ij}(t)$;
- вероятность отказа в момент t ;
- вероятность работоспособного состояния в момент t ;
- изобразить граф состояний.

Задание № 6. Для технической системы известны:

- начальный вектор $P_0 = \{0,3;0,7;0;0\}$;
- матрица вероятностей переходов;
- вероятность отказа $Q(t) = 0,17$.

$$P_{ij}(t) = \begin{pmatrix} 0,30 & 0,40 & - & 0,10 \\ 0,15 & 0,30 & - & - \\ 0,20 & 0,47 & 0,30 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Определить:

- неизвестные элементы матрицы $P_{ij}(t)$;
- вероятность работоспособного состояния $R(t)$;
- изобразить граф состояний.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

1. В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2012. – 368 с.
2. Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб.пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. – Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. – 275 с. : ил. – Библиогр.: с. 264-273
3. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб. пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. – 313 с. : ил. ; 21. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 307-310. – ISBN 978-5-8114-1268-6
4. <http://www.tehdoc.ru/> - Интернет-проект Техдок.ру - Форум специалистов по охране труда.
5. <http://novtex.ru/bjd/> - Журнал «Безопасность жизнедеятельности».
6. <http://www.complexdoc.ru/> - База нормативных документов и технических стандартов.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

$$\Phi_0(U) = \frac{1}{\sqrt{2} * \pi_0} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

z	Сотые доли для z									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	040	080	120	160	199	239	279	319	359
0,1	398	438	478	517	557	596	636	675	714	753
0,2	793	832	871	910	948	987	0,26	064	103	141
0,3	0,1179	217	255	293	331	368	406	443	480	517
0,4	554	591	628	664	700	736	772	808	844	879
0,5	915	950	985	019	054	088	123	157	190	224
0,6	0,2257	291	324	357	389	422	454	486	517	549
0,7	580	611	642	673	703	734	764	794	823	852
0,8	881	910	939	967	995	0,23	051	078	106	133
0,9	0,3159	186	212	238	264	289	315	340	365	389
1,0	413	437	461	485	508	583	554	577	599	621
1,1	643	665	686	708	729	749	770	790	810	830
1,2	849	869	888	907	925	944	962	980	997	015
1,3	0,4032	049	066	082	099	115	131	147	162	177
1,4	192	207	222	236	251	265	279	292	306	319
1,5	332	345	357	370	382	394	406	418	429	441
1,6	452	463	474	484	495	505	515	525	535	545
1,7	554	564	573	582	591	599	608	616	625	633
1,8	641	649	656	664	671	678	686	693	699	706
1,9	713	719	726	732	738	744	750	756	761	767
2,0	772	778	783	788	793	798	803	808	812	817
2,1	821	826	830	834	838	842	846	850	854	857
2,2	860	864	867	871	874	877	880	883	886	889
	966	474	906	263	545	755	894	962	962	893
2,3	892	895	898	900	903	906	908	911	913	915
2,4	918	920	922	924	926	928	930	932	934	936
	025	237	397	506	564	572	531	493	309	128
2,5	937	939	941	942	944	946	947	949	950	952
	903	634	323	969	574	139	664	151	600	012
2,6	0,4953	954	956	957	958	959	960	962	963	964
	388	729	035	308	547	754	930	074	189	274
	965	966	967	968	969	970	971	971	972	973
	330	358	359	333	280	202	099	972	821	646
2,8	974	975	975	976	977	978	979	979	980	980
	449	229	988	726	443	140	818	476	116	738
2,9	981	981	982	983	983	984	984	985	985	986

Продолжение приложения А

	342	929	498	052	589	111	618	110	588	051
3,0	986	986	987	987	988	988	988	989	989	989
	501	938	361	772	171	558	933	297	650	992
3,1	990	990	990	991	991	991	992	992	992	992
	324	646	957	260	553	836	112	378	636	886
3,2	993	993	993	993	994	994	994	994	994	994
	129	363	590	810	024	230	429	623	810	991
3,3	995	995	995	995	995	996	996	996	996	996
	166	335	499	658	811	959	103	242	376	505
3,4	996	996	996	996	997	997	997	997	997	997
	631	752	869	982	091	197	299	398	493	585
3,5	997	997	997	997	997	998	998	998	998	998
	674	759	842	992	999	974	146	215	282	347
3,6	998	998	998	998	998	998	998	998	998	998
	409	469	527	583	637	689	739	787	834	879
3,7	998	998	999	999	999	999	999	999	999	999
	922	964	004	043	080	116	150	184	216	247
3,8	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	274	305	333	359	385	409	433	456	478	499
3,9	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	519	539	557	575	593	609	625	641	655	670
4,0	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	683	696	709	721	733	744	755	765	775	784
4,1	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	793	802	811	819	826	834	841	848	854	961
4,2	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	867	872	878	883	888	893	898	902	907	911
4,3	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	915	918	922	925	929	932	935	938	841	943
4,4	0,4999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	946	948	951	953	955	957	959	961	963	964
4,5	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	966	968	969	971	972	973	974	976	977	978
5,0	999									
	997									

В таблице заданы лишь три последних десятичных знака из четырех; первый из них записан в графе «0» данной строки или выше данной. Если перед последними тремя десятичными знаками стоит точка, то это означает, что первый десятичный знак надо смотреть в графе «0» следующей строки. Например, для $z = 0,53$ имеем $\Phi_0(0,53) = 0,2019$ (а не 0,1019).

Для значения $2,2 \leq z \leq 50$ под основными четырьмя знаками функции $\Phi_0(z)$ даются еще три десятичных знака. Например, при $z = 3,51$ находим $(3,51) = 0,4997$, т. е. $\Phi_0 = 0,4997759$.

Пример. Требуется определить вероятность того, что нормально распределенная нормированная величина z имеет значение в интервале от 0 до 3,28. Имеем $P(0 < z < 3,28)$, $\Phi_0(3,28) = 0,4994810$.

Приложение Б

Значения функции $\varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2}}$

х		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	0,	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	0,	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	0,	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3725	3712	3697
0,4	0,	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	0,	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	0,	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	0,	3123	3101	3079	3055	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	0,	2897	2974	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	0,	2661	2637	2613	2589	2535	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,	2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	0,	2179	2155	2131	2107	3083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	0,	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	0,	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	0,	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	0,	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	0,	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0,0	9405	9246	9089	8933	8780	8628	8478	8329	8183	8038
1,8	0,0	7895	7754	7614	7477	7341	7206	7074	6943	6814	6687
1,9	0,0	6562	6438	6316	6195	6077	5959	5844	5730	5618	5508
2,0	0,0	5399	5292	5186	5082	4980	4879	4780	4682	4586	4491
2,1	0,0	4398	4307	4217	4128	4041	3955	3871	3788	3706	3626
2,2	0,0	3547	3470	3394	3319	3246	3174	3103	3034	2965	2698
2,3	0,0	2833	2768	2705	2643	2582	2522	2463	2406	2349	2294
2,4	0,0	2239	2186	2134	2083	2033	1984	1936	1888	1842	1797
2,5	0,0	1753	1709	1667	1625	1585	1545	1506	1468	1431	1394
2,6	0,0	1358	1324	1289	1256	1223	1191	1160	1130	1100	1071
2,7	0,0	1042	1014	0987	0961	0935	0909	0885	0861	0837	0814
2,8	0,00	7915	7696	7483	7274	7071	6873	6679	6491	6307	6127
2,9	0,00	5952	5782	5616	5454	5296	5143	4993	4847	4705	4567
3,0	0,00	4432	4301	4173	4049	3928	3810	3695	3584	3475	3370
3,	0,00	4432	3267	2384	1723	1232	0873	0612	0425	0292	0199
4,	0,0 ³	1338	0893	0589	0385	0249	0160	0101	0064	0040	0024
5,	0,0 ⁵	1487	0897	0536	0317	0186	0108	0062	0035	0020	0011

[illegible]

X	X									
	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,00	1,000	0,9990	0,9980	0,9970	0,9960	0,9950	0,9940	0,9930	0,9920	0,9910
0,01	0,9900	0,9891	0,9891	0,9871	0,9861	0,9851	0,9841	0,9831	0,9822	0,9812
0,02	0,9802	0,9792	0,9782	0,9773	0,9763	0,9753	0,9743	0,9734	0,9724	0,9714
0,03	0,9704	0,9695	0,9685	0,9675	0,9666	0,9656	0,9646	0,9637	0,9627	0,9618
0,04	0,9608	0,9598	0,9588	0,9579	0,9570	0,9560	0,9550	0,9541	0,9531	0,9522
0,05	0,9512	0,9502	0,9493	0,9484	0,9474	0,9465	0,9455	0,9446	0,9436	0,9427
0,06	0,9418	0,9408	0,9399	0,9389	0,9380	0,9371	0,9361	0,9352	0,9343	0,9333
0,07	0,9324	0,9315	0,9305	0,9226	0,9287	0,9277	0,9258	0,9259	0,9250	0,9240
0,08	0,9231	0,9222	0,9213	0,9204	0,9194	0,9185	0,9176	0,9167	0,9158	0,9148
0,09	0,9139	0,9130	0,9121	0,9112	0,9103	0,9094	0,9085	0,9076	0,9066	0,9057
	0	0,1	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,9048	0,8958	0,8869	0,8781	0,8694	0,8607	0,8521	0,8437	0,8353	0,8270
0,2	0,8187	0,8106	0,8025	0,7945	0,7866	0,7788	0,7711	0,7634	0,7558	0,7483
0,3	0,7408	0,7334	0,7261	0,7189	0,7118	0,7047	0,6977	0,6907	0,6839	0,6771
0,4	0,6703	0,6637	0,6570	0,6505	0,6440	0,6376	0,6313	0,6250	0,6188	0,6126
0,5	0,6065	0,6005	0,5945	0,5886	0,5825	0,5769	0,5712	0,5655	0,5599	0,5543
0,6	0,5488	0,5434	0,5379	0,5326	0,5273	0,5220	0,5169	0,5117	0,5066	0,5016
0,7	0,4966	0,4916	0,4868	0,4819	0,4771	0,4724	0,4677	0,4630	0,4584	0,4538
0,8	0,4493	0,4449	0,4404	0,4360	0,4317	0,4274	0,4232	0,4190	0,4148	0,4107
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,9	0,4066	0,4025	0,3985	0,3946	0,3906	0,3867	0,3829	0,3791	0,3753	0,3716
1,0	0,3679	0,3642	0,3606	0,3570	0,3535	0,3499	0,3465	0,3430	0,3396	0,3362
1,1	0,3329	0,3296	0,3263	0,3230	0,3198	0,3166	0,3135	0,3104	0,3073	0,3042
1,2	0,3012	0,2982	0,2952	0,2923	0,2894	0,2865	0,2837	0,2808	0,2780	0,2753
1,3	0,2725	0,2698	0,2671	0,2645	0,2618	0,2592	0,2567	0,2541	0,2516	0,2491
1,4	0,2466	0,2441	0,2417	0,2393	0,2369	0,2346	0,2322	0,2299	0,2276	0,2254
1,5	0,2231	0,2209	0,2187	0,2165	0,2144	0,2122	0,2101	0,2080	0,2060	0,2039
1,6	0,2019	0,1999	0,1979	0,1959	0,1940	0,1920	0,1901	0,1882	0,1864	0,1845
1,7	0,1827	0,1809	0,1791	0,1773	0,1755	0,1738	0,1720	0,1703	0,1686	0,1670
1,8	0,1653	0,1637	0,1620	0,1604	0,1588	0,1572	0,1557	0,1541	0,1526	0,1511
1,9	0,1496	0,1481	0,1466	0,1451	0,1437	0,1423	0,1409	0,1395	0,1381	0,1367
2,0	0,1353	0,1340	0,1327	0,1313	0,1300	0,1287	0,1275	0,1262	0,1249	0,1237
2,2	0,1108	0,1097	0,1086	0,1075	0,1065	0,1054	0,1044	0,1033	0,1023	0,

Приложение Д

Значения условной вероятности поражения в зависимости от Pr

Условная вероятность поражения, %	P_r									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,90	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
—	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания
по организации самостоятельной работы

Надежность технических систем и техногенный риск

Направление подготовки	20.03.01 Техносферная безопасность
Направленность (профиль)	Пожарная безопасность
Форма обучения	заочная
Год начала обучения	20246
Реализуется в <u>5</u> семестре	

Введение

При изучении дисциплины «Надежность технически систем и техногенный риск» учебным планом предусмотрены аудиторные занятия (лекции и практические), а также самостоятельная работа студентов (СРС) по изучению основной и дополнительной литературы.

Основными формами работы и контроля СРС в данном курсе являются:

- самостоятельное изучение основного и дополнительного материала по темам, представленным в рабочей программе дисциплины. Отчет по данной форме контроля представляется в форме конспекта. Данное мероприятие сочетает письменную и устную формы деятельности студента; выявляет аналитические умения, навыки выделения смысловых центров текста;

- подготовка к экзамену

В данных методических указаниях представлены рекомендации по организации самостоятельной работы по данным направлениям.

Оглавление

Введение	Error! Bookmark not defined.
Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск».....	121
План-график выполнения самостоятельной работы	122
Контрольные точки и виды отчетности по ним	Error! Bookmark not defined.
Методические рекомендации по изучению теоретического материала	122
Методические указания выполнению контрольной работы ..	Error! Bookmark not defined.
Методические указания по подготовке к экзамену	132
Литература.....	1

Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск»

При изучении курса предусмотрены следующие виды самостоятельной работы:

1. Самостоятельное изучение материала по темам дисциплины (в соответствии с рабочей программой);
2. Подготовка к практическим занятиям;

Самостоятельное изучение теоретического материала сочетает устную и письменную работу студента и организуется с целью формирования у студентов навыков поиска информации по определенной тематике, работы с текстовой информацией, выделения главного смыслового содержания текста и умения представить его краткое изложение в письменном виде, а также сформулировать теоретический ответ по рассматриваемому вопросу.

Данный вид работы способствует формированию следующих элементов компетенций:

ИД-2_{ОПК-2} Применяет при разработке методов обеспечения безопасности знания концепции риск-ориентированного мышления

ИД-1_{ОПК-4} Рассматривает различные варианты решения задачи на основе критического анализа доступных источников информации

ИД-4_{ОПК-4} Владеет навыками применения современных информационных технологий для решения задач профессиональной деятельности.

План-график выполнения самостоятельной работы

Коды реализуемых компетенций, индикаторов	Вид деятельности студентов	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
			СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
5 семестр					
ИД-2 ОПК-2 ИД-1ОПК-4 ИД-4ОПК-4	Самостоятельное изучение литературы	Опрос, собеседование	90,25	5	95,25
Итого за 5 семестр			90,25	5	95,25
Итого			90,25	5	95,25

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

При изучении дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск» учебным планом предусмотрены аудиторские занятия (лекции и практические), а также самостоятельная работа студентов (СРС) по изучению основной и дополнительной литературы, выполнение контрольной работы.

Основными формами работы и контроля СРС в данном курсе являются:

- самостоятельное изучение основного и дополнительного материала по темам, представленным в рабочей программе дисциплины. Отчет по данной форме контроля представляется в форме конспекта. Данное мероприятие сочетает письменную и устную формы деятельности студента; выявляет аналитические умения, навыки выделения смысловых центров текста;

Оценка знаний с помощью собеседования

Проверка знаний материала лекционных и практических занятий проводится в виде собеседования. Предполагается, что отдельные вопросы тем дисциплины изучаются студентами самостоятельно. Знания указанных вопросов проверяются наличием конспектов и собеседованием. Ниже приведены вопросы для собеседования по темам курса «Надежность технических систем и техногенный риск».

Данное оценочное мероприятие проводится на практических занятии на основании материалов и знаний, полученных на лекциях, а также при изучении основной и дополнительной литературы. Для подготовки к данному оценочному мероприятию студенту необходимо подготовить устные ответы на вопросы собеседования, либо законспектировать данные ответы в тетрадь. При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования материалами лекций, основной и дополнительной литературы, а также интернет-ресурсов.

При проверке задания, оцениваются:

- правильность ответов;
- чёткое знание терминологии;
- умение грамотно, четко и последовательно излагать материал;
- использование дополнительной литературы при подготовке;
- умение анализировать теоретический материал и сопоставлять его с практикой;
- знание статистических данных об изучаемых процессах и явлениях;
- умение приводить конкретные примеры.

В процессе самостоятельного изучения отдельных вопросов тем дисциплины рекомендуется работа с литературой, перечень которой приведен в конце методических указаний.

Базовый уровень

Тема 1. Надёжность как комплексное свойство технического объекта (прибора, устройства, машины. системы) ".

1. Перечислите основные составляющие надежности
2. Источники возникновения науки «Надежность технических систем и техногенный риск».
3. Предпосылки возникновения науки «Надежность технических систем и техногенный риск».
4. Причины возникновения науки «Надежность технических систем и техногенный риск».
5. Что такое ремонтпригодность?
6. Что такое долговечность?
7. Что такое безотказность?
8. Что такое сохраняемость?

Тема 2. Сущность надёжности как способности выполнять заданные функции, сохраняя свои основные характеристики в установленных пределах, при определённых условиях эксплуатации

1. Что такое эффективность технической системы?
2. Что такое качество системы?
3. Какие компоненты включает качество системы?
4. Перечислите показатели безотказности
5. Перечислите показатели ремонтпригодности
6. Перечислите показатели сохраняемости
7. Перечислите показатели долговечности

Тема 3. Безотказность, долговечность и сохраняемость как основные компоненты надёжности. Теоретические законы распределения отказов

1. Какие существуют основные законы распределения отказов в теории надёжности?
2. Какие процессы наиболее точно описывает распределение Вейбулла?
3. Какие процессы наиболее точно описывает распределение Релея?
4. Какие процессы наиболее точно описывает нормальное распределение?
5. Какие процессы наиболее точно описывает гамма-распределение?
6. Какие процессы наиболее точно описывает экспоненциальное распределение?

Тема 4. Резервирование как метод повышения надёжности системы

1. Какие есть виды резервирования?
2. Что такое основная система?
3. В чем отличие целого резервирования от дробного?
4. В чем особенность резерва облегченного, нагруженного и ненагруженного?

Тема 5. Основы расчета надёжности технических систем по надёжности их элементов.

1. Какие существуют методы расчета технических систем по надёжности элементов?
2. Что такое структурная надёжность?
3. Что такое функциональная надёжность?
4. Перечислите этапы расчета надёжности
5. Что такое структурно-логическая схема?

Тема 7. Основы теории риска. Анализ риска. Нормативные значения риска. Снижение опасности риска.

1. Что такое диаграмма Фармера?
2. Назовите величину предельно допустимого риска для строящихся объектов
3. Назовите величину предельно допустимого риска для существующих объектов
4. Чему равна величина приемлемого риска?

5. Что такое принцип ALAR?

Тема 8. Аварийная подготовленность. Аварийное реагирование. Управление риском. Допустимый риск

1. Перечислите первичные и вторичные показатели риска
2. Что такое риск?
3. Какие существуют подходы к количественной оценке риска?
4. Что такое индивидуальный риск?
5. Перечислите элементы анализа техногенного риска

Тема 9. Инженерные методы исследования безопасности технических систем как инструментарий управления риском.

1. Перечислите закономерности построения дерева событий
2. Перечислите закономерности построения дерева отказов
3. Какие особенности построения дерева происшествий?
4. В чем сущность логического анализа?
5. В чем особенности использования метода анализа «Что будет если...?»
6. В чем особенности использования метода «Проверочный лист?»

Тема 10. Исследование надежности технических систем. Технические системы безопасности

1. Какие методы обеспечения надёжности на стадии проектирования технических систем?
2. Какие существуют методы обеспечения надёжности на стадии изготовления технических систем?
3. Какие существуют методы обеспечения надёжности на стадии эксплуатации технических систем?
4. Какие существуют средства предупреждения отказов?
5. Какие существуют средства контроля?
6. Какие существуют средства защиты?
7. Какие существуют технические системы безопасности?
8. Какие существуют типовые локальные технические системы и средства безопасности?

Тема 11. Роль внешних факторов, воздействующих на формирование отказов технических систем

1. Как влияет температурный режим на формирование отказов технических систем?
2. Какова роль влажности в формировании отказов?
3. Как влияет давление на формирование отказов?
4. Какие существуют типы коррозии?
5. Какова роль биологических факторов в формировании отказов?

Повышенный уровень

Тема 1. Надёжность как комплексное свойство технического объекта (прибора, устройства, машины, системы) "

1. Перечислите этапы жизненного цикла технической системы
2. В чем отличие технической системы от социальной
3. Перечислите этапы формирования неработоспособного состояния
4. Чем отличается неисправность от неработоспособности?
5. Чем отличается отказ от дефекта?
6. Может ли быть объект работоспособным, но неисправным?
7. Дайте определения неисправности и неработоспособности
8. Что такое предельное состояние?

Тема 2. Сущность надёжности как способности выполнять заданные функции, сохраняя свои основные характеристики в установленных пределах, при определенных условиях эксплуатации

1. Приведите математическую интерпретацию показателей безотказности
2. Приведите математическую интерпретацию показателей долговечности
3. Приведите математическую интерпретацию показателей ремонтпригодности
4. Приведите математическую интерпретацию показателей сохраняемости
5. Чем отличается частота отказов от интенсивности отказов?
6. Приведите графическую интерпретацию вероятности отказов и вероятности безотказной работы
7. Приведите графическую интерпретацию наработки до отказа

Тема 3. Безотказность, долговечность и сохраняемость как основные компоненты надёжности. Теоретические законы распределения отказов

1. Приведите формулу экспоненциального распределения отказов
2. Приведите формулу распределения Вейбулла
3. Приведите формулу распределения Релея
4. Приведите формулу нормального распределения
5. Приведите формулу гамма-распределения
6. Вентиляция. Классификация систем вентиляции.
7. Принцип устройства механических систем вентиляции.
8. Особенности организации вентиляции на предприятиях промышленности.

Тема 4. Резервирование как метод повышения надежности систем

1. В чем особенности распределения норм надежности по принципу равнонадежности элементов?
2. В чем особенности распределения норм надежности с учетом данных об аналогах элементов?
3. В чем особенности распределения норм надежности с учетом перспектив совершенствования элементов?
4. Приведите формулу расчета надежности систем с нагруженным резервированием
5. Приведите формулу расчета надежности систем с ненагруженным резервированием

Тема 5. Основы расчета надежности технических систем по надежности их элементов.

6. Какие существуют методы расчета технических систем по надежности элементов?
7. Что такое структурная надежность?
8. Что такое функциональная надежность?
9. Перечислите этапы расчета надежности
10. Что такое структурно-логическая схема?

Тема 7. Основы теории риска. Анализ риска. Нормативные значения риска. Снижение опасности риска.

6. Что такое диаграмма Фармера?
7. Назовите величину предельно допустимого риска для строящихся объектов
8. Назовите величину предельно допустимого риска для существующих объектов
9. Чему равна величина приемлемого риска?
10. Что такое принцип ALAR?

Тема 8. Аварийная подготовленность. Аварийное реагирование. Управление риском. Допустимый риск

6. Перечислите первичные и вторичные показатели риска
7. Что такое риск?
8. Какие существуют подходы к количественной оценке риска?
9. Что такое индивидуальный риск?
10. Перечислите элементы анализа техногенного риска

Тема 9. Инженерные методы исследования безопасности технических систем как инструментарий управления риском.

7. Перечислите закономерности построения дерева событий
8. Перечислите закономерности построения дерева отказов
9. Какие особенности построения дерева происшествий?
10. В чем сущность логического анализа?
11. В чем особенности использования метода анализа «Что будет если...?»
12. В чем особенности использования метода «Проверочный лист?»

Тема 10. Исследование надежности технических систем. Технические системы безопасности

9. Какие методы обеспечения надёжности на стадии проектирования технических систем?
10. Какие существуют методы обеспечения надёжности на стадии изготовления технических систем?
11. Какие существуют методы обеспечения надёжности на стадии эксплуатации технических систем?
12. Какие существуют средства предупреждения отказов?

13. Какие существуют средства контроля?
14. Какие существуют средства защиты?
15. Какие существуют технические системы безопасности?
16. Какие существуют типовые локальные технические системы и средства безопасности?

Тема 11. Роль внешних факторов, воздействующих на формирование отказов технических систем

6. Как влияет температурный режим на формирование отказов технических систем?
7. Какова роль влажности в формировании отказов?
8. Как влияет давление на формирование отказов?
9. Какие существуют типы коррозии?
10. Какова роль биологических факторов в формировании отказов?

Критерии оценивания компетенций*

Оценка «отлично» выставляется студенту, если студент показал глубокое, прочное и аргументированное освоение программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт последовательно, четко и логически стройно, в полном исчерпывающем объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, не допущено при ответе ошибок

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент показал твердое знание программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт грамотно и по существу, в достаточно полном объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, допущены при ответе отдельные неточности или одна ошибка.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент показал знание только основной части учебного материала без его частных деталей, при этом поставленный вопрос раскрыт с нарушением логической последовательности, не в полном объеме; были допущены неточные формулировки основных категорий, понятий и терминов учебного курса, а также ошибки (не более двух) или ряд незначительных неточностей, не искаживших существенно суть ответа.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки (более

двух), существенно искажившие его суть. Оценка неудовлетворительно выставляется также, если отсутствует ответ на вопрос, либо студент отказался его сдавать.

Описание шкалы оценивания

Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя: собеседование.

Предлагаемые студенту задания позволяют проверить компетенции ОПК-1, ОПК-4.

Особенности заданий базового уровня состоят в том, что студент способен объяснять и применять в предлагаемом контексте термины и понятия курса; анализировать и классифицировать информацию, представленную схематически; соотносить текстовую информацию со знаниями курса.

Особенности заданий повышенного уровня состоят в том, что студент, владеющей информацией на повышенном уровне может раскрывать теоретические положения на конкретных примерах, решать проблемные задачи, используя теоретические знания; самостоятельно находить информацию, необходимую для формулирования собственных суждений; критически воспринимать информацию, получаемую из текстовых источников, аргументировать собственную позицию, подтверждая её адекватными примерами из курса

дисциплины, смежных учебных дисциплин и собственного жизненного опыта.

Для подготовки к данному оценочному мероприятию необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой, ресурсами Интернет, периодическими изданиями, присутствующими в читальном зале библиотеки корпуса 11. Примерное время, отводимое на подготовку каждой теме приведено в рабочей программе дисциплины.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования калькулятором, справочными материалами, нормативными документами.

При проверке задания оцениваются последовательность и рациональность выполнения, - развитость мышления (гибкость, рациональность, оригинальность), сформированность умения решать задачи, сформированность прикладных умений (способность решать практические проблемы, применять новые технологии для решения прикладных задач и т.д.), умение чётко и аргументировано излагать свою мысль, грамотность в оформлении решений задач, сформированность умений самоконтроля и самооценки (самокритичность, умение работать над ошибками, реалистичность в оценке своих способностей).

Методические указания по подготовке к экзамену

Процедура проведения экзамена осуществляется в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования в СКФУ.

В экзаменационный билет включаются 2 теоретических вопроса и 1 практическое задание. Вопросы и задания повышенного уровня основаны на навыках и умениях применения обучаемыми знаний базового уровня применительно к конкретным условиям или ситуациям. Они основываются на анализе базового материала.

Для подготовки по билету отводится 30 минут.

При подготовке к ответу у студента не необходимости пользоваться дополнительными материалами и техническими средствами.

При проверке практического задания, оцениваются:

- правильность и точность ответов;
- рациональность выполнения;
- анализ составленных схем;
- умение приводить конкретные примеры рассматриваемых ситуаций.

Критерии оценивания компетенций*

Оценка *«отлично»* выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач.

Оценка *«хорошо»* выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.

Оценка *«удовлетворительно»* выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.

Оценка *«неудовлетворительно»* выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы. Отметка *«неудовлетворительно»* выставляется также, если обучающийся после начала экзамена отказался его сдавать.

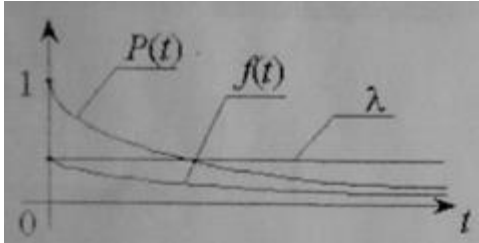
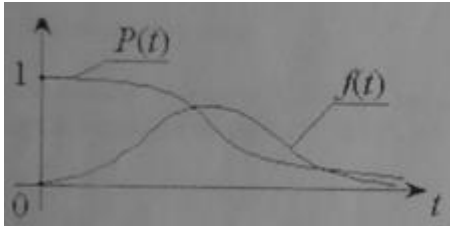
ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕРКИ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ

Номер задания	Правильный ответ	Содержание вопроса	Компетенция
Тестовые задания			
1.	b	Исправное состояние объекта а) это такое состояние, при котором объект соответствует хотя бы одному требованию нормативно-технической и конструкторской документации; б) это такое состояние, при котором объект соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации; с) вероятность того, что восстанавливаемый элемент окажется работоспособным в произвольный момент времени.	ОПК-2
2.	c e	К комплексным показателям надежности относятся: а) безотказность б) ремонтпригодность с) коэффициент готовности д) долговечность е) коэффициент технического использования ф) сохраняемость	ОПК-2
3.	a	Параметр потока отказа может быть определен как: а) отношение числа отказов объекта за определенный интервал времени к длительности этого интервала при ординарном потоке отказов б) плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени с) условная плотность вероятности восстановления работоспособности объекта, определенная для рассматриваемого момента времени, при условии, что до этого момента восстановление не было завершено д) усредненное на заданном интервале значение нестационарного коэффициента оперативной готовности	ОПК-2
4.	b	Укажите, что такое неработоспособное состояние? а) Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. б) Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.	ОПК-2

		с) Состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. d) Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.	
5.	d	Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и ремонте, называется: a) сохраняемостью b) долговечностью c) ремонтпригодностью d) безотказностью	ОПК-2
6.	c	Укажите величину приемлемого риска a) 10^{-5} b) 10^{-4} c) 10^{-6}	ОПК-4
7.	b	Укажите величину предельно допустимого риска для строящихся производств. a) 10^{-4} b) 10^{-5} c) 10^{-6}	ОПК-4
8.	b	Закончите фразу «... - мера, характеризующая как возможность возникновения происшествий, так и размеры связанного с ними ущерба» a) Опасность b) Риск c) Надежность	ОПК-4
9.		Предпосылки возникновения дисциплины надежность технических систем и техногенный риск.	ОПК-2
10.		Виды систем. Жизненный цикл системы	ОПК-2
11.		Предмет дисциплины НТС и ТР. Определение надежности и ее составляющих.	ОПК-2
12.		Техническая система. Техническое состояние системы.	ОПК-2
13.		Схема возникновения опасных и безопасных состояний системы.	ОПК-2
14.		Надежность как комплексное свойство объектов. Составляющие надежности.	ОПК-2
15.		Невосстанавливаемый элемент. Показатели безотказности.	ОПК-2
16.		Комплексные показатели надежности	ОПК-2
17.		Отказ. Причины и виды отказов.	ОПК-2

18.		Классификации отказов.	ОПК-2
19.		Резервирование. Виды.	ОПК-2
20.		Дробное резервирование. Кратность резервирования. Мажоритарное резервирование.	
21.		Расчет структурной надежности технических систем с параллельным соединением элементов	ОПК-2
22.		Расчет структурной надежности технических систем с основным соединением элементов	ОПК-2
23.		Способы преобразования сложных структур. Метод разложения относительно особого элемента.	ОПК-2
24.		Риск. Приемлемый уровень риска. Предельно допустимый уровень риска.	ОПК-4
25.		Потенциальный территориальный риск	ОПК-4
26.		Основные положения анализа риска опасных производственных объектов. Оценка риска.	ОПК-4
27.		Технический риск. Количественная оценка. Источники и факторы технического риска	ОПК-4
28.		Риск. Виды риска. Первичные и вторичные показатели риска.	ОПК-4
29.		Социальный риск. F/N - диаграмма. F/G - диаграмма.	ОПК-4
30.		Индивидуальный риск. Особенности оценки.	ОПК-4
31.		Управление риском. Основные механизмы управления риском	ОПК-4
32.		Влияние внешних факторов на формирование отказов технических систем	ОПК-4
Практические задачи			
33.	3/5	Рассчитайте кратность резервирования, если общее количество элементов 5, а количество элементов, необходимых для функционирования системы 2?	ОПК-2
34.	0,9516	Вычислить вероятность безотказной работы системы, состоящей из двух насосов с основным соединением и постоянными интенсивностями отказов, $\lambda_1 = 0,0003$ 1/час и $\lambda_2 = 0,0002$ 1/час за 100 часов.	ОПК-2
35.	1428,6	Вычислить среднее время безотказной работы системы, состоящей из двух насосов с основным соединением и постоянными интенсивностями отказов, $\lambda_1 = 0,0005$ 1/час и $\lambda_2 = 0,0002$ 1/час.	ОПК-2
36.	0,929	Прибор состоит из $n = 5$ последовательно соединенных узлов. Надежность узлов характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени t , которая равна: $P_1(t)=0,98$; $P_2(t)=0,99$; $P_3(t)=0,998$; $P_4(t)=0,975$; $P_5(t)=0,985$. Определить вероятность безотказной работы прибора.	ОПК-2

37.	0,003	Система состоит из 12000 последовательно соединенных элементов, средняя интенсивность отказов которых $0,30 \cdot 10^{-6}$ (в степени -6) 1/час. Определить частоту отказов системы за 50 час.	ОПК-2
38.	0,6	Система состоит из 10 независимых элементов, имеющих основное соединение. Надежность каждого из элементов равна 0,95. Чему равна надежность системы?	ОПК-2
39.	20	Отказы 10-ти невосстанавливаемых объектов произошли в следующие моменты времени t : 5, 12, 19, 7, 25, 17, 43, 52, 9, 11. Чему равно математическое ожидание безотказной работы.	ОПК-2
40.	0,05	Отказы 10-ти невосстанавливаемых объектов произошли в следующие моменты времени t : 5, 12, 19, 7, 25, 17, 43, 52, 9, 11. Определить значение безусловной вероятности безотказной работы на интервале (5, 15) ч.	ОПК-2
41.	0,548	Определить вероятность безотказной работы элемента за 100 ч, если она подчиняется экспоненциальному закону с безусловной вероятностью безотказной работы 0,006.	ОПК-2
42.	0,000022	На испытание поставлено 700 изделий. За время $t = 3000$ час отказало 200 изделий. За интервал времени дельта $t = 100$ час отказало еще 100 изделий. Определить интенсивность отказов за период от 3000 до 3100 часов.	ОПК-2
43.	$R = 275 \cdot 10^3 / 5,5 \cdot 10^9 = 5 \cdot 10^{-4}$ см. исх/год·чел	Определить риск гибели человека от всех опасностей, если в год погибает $275 \cdot 10^3$ человек, а численность населения $5,5 \cdot 10^9$ человек.	ОПК-4
44.	$n = 150 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6} = 150$ человек	Найдите вероятную численность фатальных исходов в год, если риск равен приемлемому, а численность населения 150 млн чел.	ОПК-4
45.	0,428	На испытание поставлено 700 изделий. За время $t = 3000$ час отказало 200 изделий. За интервал времени дельта $t = 100$ час отказало еще 100 изделий. Определить вероятность безотказной работы за период от 0 до 3100 часов.	ОПК-2

46.	$9,2 \cdot 10^{-5}$	Определить риск гибели людей от действия электрического тока, если в год погибает 1200 человек, а численность населения $130 \cdot 10^5$ человек	ОПК-4
47.	180	Найдите вероятную численность фатальных исходов в год, если риск равен приемлемому, а численность населения 180 млн чел.	ОПК-4
48.	$0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,6$	Система состоит из трех последовательно включенных элементов с коэффициентами готовности $K_{г1}=0,5$, $K_{г2}=0,9$, $K_{г3}=0,6$. Найти коэффициент готовности системы.	ОПК-2
49.	экспоненциальный	Для какого закона распределения характерны такие графики 	ОПК-2
50.	нормальный	Для какого закона распределения характерны такие графики 	ОПК-2
51.	0,387	Среднее время наработки до отказа объекта (при экспоненциальном законе) равно 125ч, а среднее время восстановления работоспособного состояния $T_{в}$ составляет 20ч. Определить коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ в момент времени 100ч	ОПК-2
52.	$6 \cdot 10^{-6}$	Определить риск гибели людей от действия электрического тока, если в год погибает 900 человек, а численность населения $150 \cdot 10^6$ человек	ОПК-4
53.	75ч	Технический объект, характеристики безотказности и ремонтпригодности которого подчиняются экспоненциальному закону имеет среднее время восстановления 50ч и коэффициент готовности 0,6. Определить среднюю наработку до отказа объекта	ОПК-2

54.	0,994	Система состоит из трех параллельно включенных блоков. Вероятность безотказной работы первого блока 0,8, второго -0,7, третьего – 0,9. Для функционирования системы необходимо, чтобы работал хотя бы один блок. Определить вероятность безотказной работы системы равна	ОПК-2
55.	$8,3 \cdot 10^{-5}$ 1/ч	Средняя наработка до отказа составляет 12000 ч. Определить интенсивность отказов	ОПК-2
56.	0,502	Интенсивность отказов составляет $5 \cdot 10^{-4}$ 1/ч. Определить вероятность отказов $Q(t)$ в момент времени 1400ч.	ОПК-2

Список рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Морозов, Н. А. Надежность технических систем
Электронный ресурс / Морозов Н. А. : учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область "инженерное дело, технологии и технические науки". - Оренбург : ОГУ, 2019. - 105 с. - Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки». - ISBN 978-5-7410-2321-1, экземпляров неограничено

2. Горев, В. А. Надежность технических систем и техногенный риск Электронный ресурс : Учебно-методическое пособие к практическим работам для обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность / В. А. Горев. - Москва : МИСИ-МГСУ, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2018. - 120 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-7264-1911-4, экземпляров неограничено

3. Резникова, И. В. Надежность технических систем и техногенный риск Электронный ресурс / Резникова И. В. : электронное учебно-методическое пособие. - Тольятти : ТГУ, 2018. - 165 с. - ISBN 978-5-8259-1224-0, экземпляров неограничено

Дополнительная литература

1. Абдулина, Е. Р. (СКФУ). Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Е. Р. Абдулина ; ФГАОУ Сев-Кав. Федер. ун-т. - Ставрополь : Издательство СКФУ, 2012. - 275 с. : ил. - Библиогр.: с. 264-273

2. Малафеев, С. И. Надежность технических систем : примеры и задачи : учеб. пособие для вузов / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 313 с. : ил. ; 21. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Гриф: Рек. УМО. - Библиогр.: с. 307-310. - ISBN 978-5-8114-1268-6

3. Надежность технических систем и техногенный риск Электронный ресурс : Учебное пособие / сост.: С. А. Сазонова, С. А. Колодяжный, Е. А. Сушко. - Воронеж : Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2013. - 147 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-89040-457-2

4. Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем : учебник для студентов вузов / В. Ю. Шишмарев. - М. : Академия, 2010. - 304 с. - (Высшее профессиональное образование. Автоматизация и управление). - Библиогр.: с. 301. - ISBN 978-5-7695-6251-8

Интернет-ресурсы

1. <http://biblioclub.ru> (Сайт ЭБС «Университетская библиотека онлайн»)
2. <http://www.complexdoc.ru/> база нормативной технической документации на русском языке,
3. <http://novtex.ru/bjd/> (Сайт журнала «Безопасность жизнедеятельности»)
4. <http://www.mchs.gov.ru/> (сайт МЧС России)
5. <http://www.bezopasnost-rf.ru/> Проект Единой России «Развитие систем обеспечения безопасности»
6. <http://www.gosnadzor.ru/> (сайт Ростехнадзора)
7. <http://www.sra.org> Международное общество анализа риска /
8. <http://www.sraeurope.org/> Европейское общество анализа риска
9. <http://www.fema.gov/> Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям (США)