



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**  
**ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический**  
**университет» (БГТУ)**  
**Политехнический колледж (ПК БГТУ)**

**УТВЕРЖДАЮ**  
**Ректор ФГБОУ ВО БГТУ**

\_\_\_\_\_ **О.Н. Федонин**

**«20» 04 2023г.**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**  
**по выполнению самостоятельной работы**  
**по междисциплинарному курсу**  
**ПМ.04 Осуществление текущего мониторинга состояния систем**  
**автоматизации**

Специальность:	<b>15.02.14 Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств (по отраслям)</b>
Уровень образования выпускника:	среднее профессиональное образование (СПО)
Программа подготовки специалиста среднего звена (ППССЗ):	базовая
Присваиваемая квалификация:	Техник
Форма обучения:	очная
Срок получения СПО по ППССЗ:	3 года 10 месяцев
Уровень образования, необходимый для приема на обучение по ППССЗ:	основное общее образование
Год приема на обучение на 1-й курс:	2023

**Брянск 2023**

**Методические рекомендации**  
**по выполнению самостоятельной работы**  
**по междисциплинарному курсу ПМ.04 Осуществление текущего**  
**мониторинга состояния систем автоматизации**  
*для специальности 15.02.14 Оснащение средствами автоматизации*  
**технологических процессов и производств (по отраслям)**

Разработал(и):

– преподаватель ПК БГТУ

Е.Г.Сергеева

МУ рассмотрены и одобрены на заседании  
предметной(цикловой) комиссии «Автоматизация  
технологических процессов и производств» ПК  
БГТУ (далее — ПЦК)

от 20. 04. 2023 г., протокол № 9

Председатель ПЦК

Е.Г.Сергеева

Согласовано:

Заместитель директора ПК БГТУ  
по учебно-методической работе

Т.Е. Балашова

© *Е.Г.Сергеева*

© ФГБОУ ВО «Брянский государственный  
технический университет»

## Содержание

Практическое занятие №1. Определение единичных показателей надежности невосстанавливаемых объектов.....	4
Практическое занятие №2. Определение показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным.....	9
Практическое занятие №3. Определение единичных и комплексных показателей восстанавливаемых объектов.....	16
Практическое занятие №4. Определение показателей надежности объектов при различных законах распределения.....	20
Практическое занятие №5. Принципы установления законов распределения случайной величины. Определение показателей надежности при наработке, подчиняющейся закону Вейбулла.....	25
Практическое занятие №6. Расчет надежности сложных систем.....	35
Практическое занятие №7. Отказы технических систем.....	39
Практическое занятие №8. Методы повышения надежности технических систем.....	48
Практическое занятие №9. Планирование испытаний на надежность.....	53
Библиографический список .....	

## Практическое занятие № 1.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕДИНИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

**Цель:** научить студентов определять показатели безотказности по статистическим данным

#### Задачи обучения:

- ознакомить с показателями безотказности и основными методами их определения;
- привить навыки определения показателей безотказности невосстанавливаемых объектов;
- обучить давать характеристику находимых показателей безотказности.

#### Задания и методические указания к их выполнению:

Работа студента заключается в изучении методик решения задач, самостоятельном решении заданий и ответах на поставленные контрольные вопросы.

**Пример 1.1.** На промышленные испытания поставлено 60 буровых лебедок. Испытания проводились в течение 2000 часов. В ходе испытаний отказало 6 буровых лебедок. Определить статистическую оценку вероятности безотказной работы изделий за время 2000 часов.

#### Решение.

*Вероятность безотказной работы  $R(t_1, t_2)$*  – вероятность выполнить требуемую функцию при данных условиях в интервале времени  $(t_1, t_2)$ . Вероятность безотказной работы определяется в предположении, что в начале интервала времени (момент начала исчисления наработки) изделие находится в работоспособном состоянии.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы определяется по формуле

$$\hat{R}(t) = 1 - \frac{n_t}{N},$$

где  $N$  – число объектов, работоспособных в начальный момент времени;

$n(t)$  – число объектов, отказавших на отрезке от 0 до  $t$ .

Подставляем исходные данные в формулу (1.1)

$$R(t) = \frac{N - n(t)}{N} = \frac{60 - 5}{60} = 0,9.$$

**Ответ.** Вероятность безотказной работы  $R(t) = 0,9$ . Вероятность безотказной работы является:

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

**Пример 1.2.** На промышленные испытания поставлено 60 буровых лебедок. Испытания проводились в течение 2000 часов. Зафиксированы отказы буровых лебедок в моменты времени  $t_1 = 1210$  ч;  $t_2 = 480$  ч;  $t_3 = 900$  ч;  $t_4 = 700$  ч;  $t_5 = 1900$  ч;  $t_6 = 1100$  ч; остальные буровые лебедки не отказали. Найти статистическую оценку среднего значения наработки до первого отказа.

**Решение:**

Средняя наработка до первого отказа – это математическое ожидание наработки по первого отказа.

Средняя наработка до первого отказа по статистическим данным определяется по формуле

$$\bar{T}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{1210 + 480 + 900 + 700 + 1900 + 1100 + 2000 \cdot 54}{60} = 1904,83 \text{ ч} \approx 1905 \text{ ч}$$

**Ответ:** Средняя наработка до первого отказ  $T_0 = 1905$  ч. Средняя наработка до первого отказа является:

- показателем безотказности;
- единичным, так как характеризует только одно свойств – безотказность;
- экспериментальным, так как определяется по результатам испытаний;

- групповым, так как характеризует надежность партии изделий.

**Пример 1.3.** На испытания поставили 200 изделий. За 100 часов работы отказало 25 изделий. За последующие 10 часов отказало еще 7 изделий. Определить статистическую оценку вероятности безотказной работы и вероятности отказа на моменты времени  $t_1 = 100$  ч и  $t_2 = 110$  ч, оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между  $t_1 = 100$  ч и  $t_2 = 110$  ч.

**Решение.** Статистическую оценку вероятности безотказной работы на момент времени  $t_1 = 100$  ч определяем по формуле:

$$\tilde{R}_{100} = 1 - \frac{n_{100}}{N} = 1 - \frac{25}{200} = 0,875;$$

Определяем количество отказавших изделий на момент времени  $t_2 = 110$  ч

$$n_{110} = n_{100} + n = 25 + 7 = 32 \text{ изд.}$$

и вероятность безотказной работы на момент времени  $t_2 = 110$  ч

$$\tilde{R}_{110} = 1 - \frac{n_{110}}{N} = 1 - \frac{32}{200} = 0,84.$$

Статистическая оценка вероятности отказа на соответствующие моменты времени определяется по формуле (1.2)

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{100} &= \frac{n_{100}}{N} = \frac{25}{200} = 0,125, \\ \tilde{Q}_{110} &= \frac{n_{110}}{N} = \frac{32}{200} = 0,16. \end{aligned}$$

Плотность распределения отказов во времени определяем по формуле (1.3)

$$\tilde{f}_{110} = \frac{n_{110}}{N} \cdot \frac{7}{200 \cdot 10} = 0,0035 \text{ 1/ч.}$$

Оценку интенсивности отказов можно определить по формуле (1.4)

$$\tilde{h}_{110} = \frac{n_{110}}{N} \cdot \frac{7}{200 \cdot 32 \cdot 10} = 0,00417 \text{ 1/ч.}$$

$\frac{n_{110}}{N} = R$ 
 $\frac{7}{200 \cdot 32 \cdot 10} = Q_{100}$

**Ответ:**  $\tilde{R} = 0,875$ ;  $\tilde{\alpha} = 0,84$ ;  $\tilde{\beta} = 0,125$ ;  
 $\tilde{Q} = 0,1$   $\tilde{f}_{110} = 0,0035$  л/ч; ~~0~~  $\tilde{f}_{110} = 0,00417$  л/ч. Данные  
 ;

показатели являются:

- показателями безотказности;
- единичными, так как характеризуют только одно свойств – безотказность;
- экспериментальными, так как определяются по результатам испытаний;
- групповыми, так как характеризуют надежность партии изделий.

### ***Задания для самостоятельной работы***

**Задача 1.1.** На испытание поставлено 200 однотипных изделий. За 2000 ч отказало 50 изделий. За последующие 100 часов отказало ещё 5 изделий. Требуется определить:

1. статистическую оценку вероятности безотказной работы за время работы  $t_1 = 2000$  час и  $t_2 = 2100$  час;
2. статистическую оценку вероятности отказа за время работы  $t_1 = 2000$  час и  $t_2 = 2100$  час;
3. оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между  $t_1 = 2000$  час и  $t_2 = 2100$  час.

**Задача 1.2.** 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.

**Задача 1.3.** На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 часов работы отказало 50 изделий. За последующие 50 часов еще 5 изделий. Дать оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между  $t_1 = 4000$  час и  $t_2 = 4050$  час.

**Задача 1.4.** 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.

**Задача 1.5.** На испытание поставлено 2000 подшипников качения. За первые 3000 часов отказало 80 изделий. За интервал времени 3000 – 4000 часов отказало еще 50 подшипников. Требуется определить статистическую оценку вероятности безотказной работы за время 4000 часов.



**Задача 1.6.** В течение 500 часов работы из 20 буровых насосов отказало 2. За интервал времени 500 – 520 часов отказал еще один буровой насос. Требуется определить статистическую оценку вероятности отказа за время 520 часов.

**Задача 1.7.** 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.

**Задача 1.8.** 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.

### Контрольные вопросы

1. Что такое безотказность?
2. Какие показатели надежности являются показателями безотказности?
3. Что такое вероятность безотказной работы?
4. Что такое вероятность отказа?
5. Как определяются статистические оценки вероятности безотказной работы и вероятности отказа?
6. Как определяется плотность распределения наработки?
7. Что такое интенсивность отказов?
8. Кривая зависимости интенсивности отказа во времени.
9. Дайте определение средней наработки до отказа и средней наработки до первого отказа.

## Практическое занятие № 2.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

**Цель:** научить студентов определять показатели безотказности по статистическим данным

#### **Задачи обучения:**

- ознакомить с методикой определения показателей безотказности по статистическим данным на определенном промежутке времени;
- привить навыки построения зависимостей показателей безотказности во времени;
- обучить давать характеристику находимых показателей безотказности.

#### **Задания и методические указания к их выполнению**

На основе представленных статистических данных провести расчет и анализ показателей надежности серии невосстанавливаемых объектов.

#### **Пример выполнения задания**

**Исходные данные:** 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 2.1.

#### **Задание:**

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.

#### **Решение.**

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

$$\tilde{N}_t \approx \tilde{N}_{nt}$$

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

$$\tilde{R}_t \approx 1 - \frac{\sum_{i=1}^n n_{it}}{N}$$

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

$$n_{it} \approx n_t - n_{nt}$$

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

$$\tilde{Q}_t \approx \frac{n_t}{N}$$

5. Определяем статистическую оценку плотности вероятности отказов по формуле

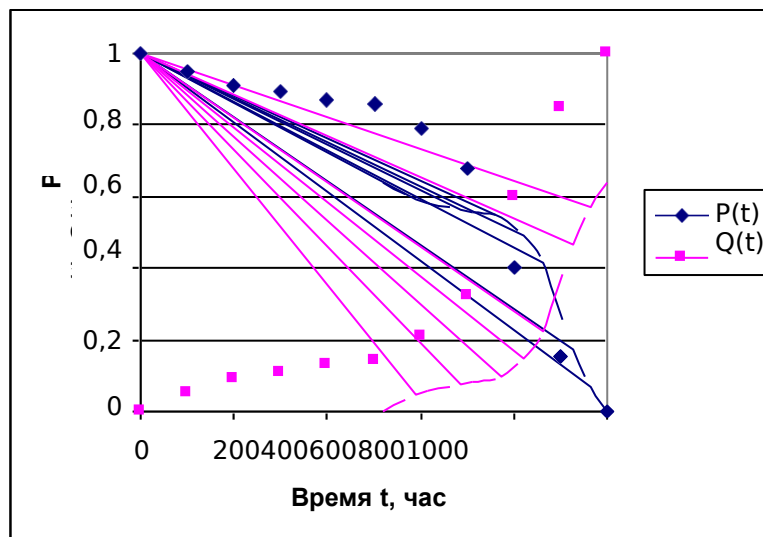
$$\tilde{f}_t \approx \frac{n_t}{N \Delta t}$$

6. Определяем значение интенсивности отказов по формуле

$$\tilde{\lambda}_t \approx \frac{n_t}{\tilde{N} \Delta t}$$

7. Результаты расчета для удобства сводим в таблицу 2.1

8. По данным расчета строим графики зависимости расчетных величин по времени (рисунки 2.1 - 2.3)



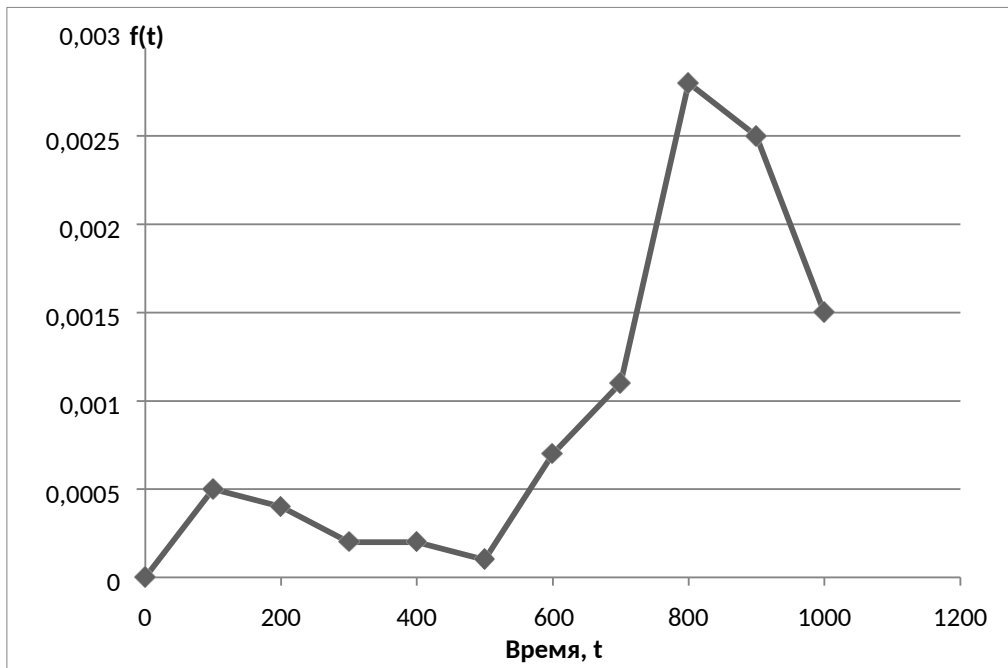
**Рис. 2.1. График зависимости вероятности безотказной работы  
и вероятности отказа от времени**

Таблица 2.1

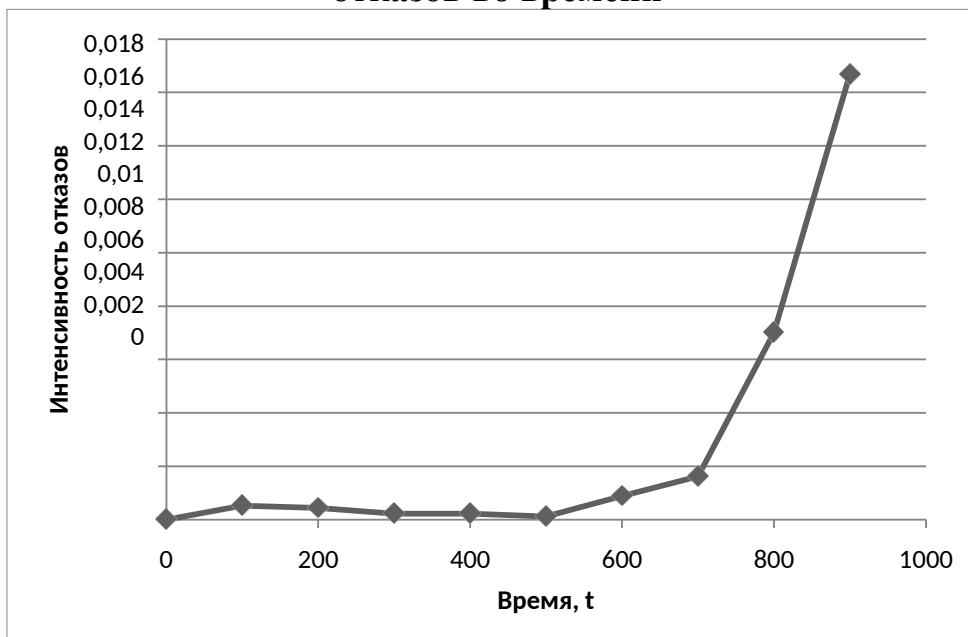
**Результаты расчета статистических оценок показателей безотказности**

Временн ой интервал $\Delta t$ , час	Колич е- ство от- казов за данн ый интерв ал $\Delta n(t)$	Количество ра- ботоспособн ых изделий на ко- нец периода $N(t)$	Количе- ство отка- завших изделий на конец периода	Вероят- ность без- отказно й работы $R(t)$	Вероят- ность отка- за $Q(t)$	Плотнос ть вероятно - сти отка- зов $f(t)$ , $\cdot 10^{-2}$	Интенсив- ность отказов $\lambda(t)$ , $\cdot 10^{-2}$
		1000					
0 – 100	5 0	950	50	0, 95	0, 05	0,0005	0,0005263 2
100 – 200	4 0	910	90	0, 91	0, 09	0,0004	0,0004395 6
200 – 300	2 0	890	110	0, 89	0, 11	0,0002	0,0002247 2
300 – 400	2 0	870	130	0, 87	0, 13	0,0002	0,0002298 9
400 – 500	1 0	860	140	0, 86	0, 14	0,0001	0,0001162 8
500 – 600	7 0	790	210	0, 79	0, 21	0,0007	0,0008860 8
600 – 700	1 1	680	320	0, 68	0, 32	0,0011	0,0016176 5

	0						
700 – 800	2 8 0	400	600	0, 4	0, 6	0,0028	0,007
800 – 900	2 5 0	150	850	0, 15	0, 85	0,0025	0,0166666 7
900 – 1000	1 5 0	0	1000	0	1	0,0015	



**Рис. 2.2. График зависимости плотности распределения отказов во времени**



**Рис. 2.3. График зависимости интенсивности отказов от времени**

### Контрольные вопросы

1. Свойства функции вероятности безотказной работы?
2. Свойства функции вероятности отказа?
3. Каким образом определяется плотность распределения наработки во времени?
4. Кривая зависимости интенсивности отказа во времени.
5. Кривая плотности распределения отказов во времени

Таблица 2.2

**Исходные данные для выполнения практической работе № 2**

Номер варианта	Общее кол- во издел ий	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	200	800	600	600	1100	210	200
3	3000	100	500	200	100	900	100	1000	600	100	500
4	5100	150	950	200	1000	500	190	1360	1100	250	750
5	1150	50	180	60	200	350	25	330	220	50	170
6	7300	1240	370	140	2300	1400	2060	1450	450	1000	1240
7	8300	250	1410	420	1700	2500	160	2320	1660	420	1240
8	300	9	51	15	6	9	6	84	60	15	45
9	1000	30	170	50	300	200	20	180	300	140	60
1	300	9	51	15	9	6	6	54	90	42	1



0											8
1 1	700	22	117	38	2 0	1 2	13	14 3	19 5	98	4 2
1 2	6700	200	1140	260	2 7 0	1 4 0	134	12 06	20 10	890	450
1 3	3700	110	630	190	1 1 0	7 0	80	66 0	11 10	520	220
1 4	1200	40	200	60	3 6	2 4	24	21 6	36 0	168	7 2
1 5	1800	60	300	90	6 0	3 0	36	32 4	54 0	252	108
1 6	1300	34	224	66	3 0	1 4	16	27 6	38 0	186	7 4
1 7	1330 0	390	2270	510	5 3 0	2 7 0	258	24 02	40 10	1770	890
1 8	7300	210	1250	370	2 1 0	1 3 0	150	13 10	22 10	1030	430
1 9	2300	70	390	110	6 2	3 8	38	422	71 0	326	134
2 0	3500	110	590	170	1 1 0	5 0	62	638	10 70	494	206

## Практическое занятие № 3.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕДИНИЧНЫХ И КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

**Цель:** научить студентов определять показатели надежности по статистическим данным

#### Задачи обучения:

- ознакомить с методикой определения единичных и комплексных показателей по статистическим данным;
- привить навыки расчета показателей надежности;
- обучить давать характеристику находимых показателей надежности.

#### Задания и методические указания к их выполнению

Работа студента заключается в изучении методик решении задач, самостоятельном решении заданий и ответах на поставленные контрольные вопросы

**Пример 3.1.** 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

$$\hat{t}_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = \frac{3250 + 3600 + 2800}{144 + 160 + 157} = 20,9 \text{ час.}$$

Средний ресурс определяем по формуле

$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^N p_i}$$



$$\frac{3250 + 3600 + 2800}{3} \approx 3216,7 \text{ час.}$$

**Ответ.** Средняя наработка до отказа равна  $\hat{M}_{cp}^{\circ}$  час,  
20,9

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  $\hat{M}_p^{\circ}$  3216,7час, данный показатель равен,

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.

**Пример 3.2.** На испытания поставлено 500 изделий. Результаты определения ресурса представлены в таблице 1.4. По данным испытаний определить гамма-процентный ресурс для  $\gamma = 95\%$ ,  $90\%$  и  $80\%$ .

Таблица 3.1

**Результаты испытаний изделий**

№ №	Интервал времени, час	Количество отказавших изде- лий 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

$$\frac{\Delta T_p}{T_p} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i(t)}}{100} \cdot \frac{1}{\gamma}$$

Определим количество работоспособных изделий и вероятность безотказной работы на конец каждого временного интервала, результаты расчета сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

**Результаты расчета**

№ №	Интервал времени, час	Количество отказавших изделий n(t)	Количество работоспособных изделий N(t) к концу периода	Вероятность безотказной работы P(t)
1	0 – 100	24	47 6	0,9 52
2	100 – 200	29	44 7	0,8 94
3	200 – 300	35	41 2	0,8 24
4	300 – 400	15	39 7	0,7 94
5	400 – 500	16	38 1	0,7 62
6	500 – 600	20	36 1	0,7 22
7	600 – 700	35	32 6	0,6 52
8	700 – 800	57	26 9	0,5 38
9	800 – 900	133	13 6	0,2 72
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.

**Ответ:** 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.

**Пример 3.3.** 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

$$\bar{t}_v = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} = \frac{2,5 + 1,8 + 1,8 + 2,6 + 0,8 + 1,2 + 0,6 + 2,0 + 1,6 + 3,2}{10} = \frac{18,1}{10} = 1,81 \text{ ч}$$

**Ответ:** среднее время восстановления равно  $\bar{t}_v = 1,81$  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.

**Пример 3.4.** Определить коэффициент готовности системы при среднем времени восстановления равном 2 часа и средней наработке на отказ равной 100 часов.

**Решение:** Среднее значение коэффициента готовности  $K_r$  вычисляют по формуле

$$K_r = \frac{N}{N + \bar{t}_v \cdot \lambda} = \frac{100}{100 + 2} = \frac{100}{102} = 0,984$$

**Ответ:** Коэффициент готовности равен  $K_r = 0,984$ .

- показателем готовности;
- комплексным, так как характеризует безотказность, ремонтпригодность и готовность;



- эксплуатационным, так как определяется по результатам эксплуатации;
- единичным, так как характеризует надежность одного изделия.

**Пример 3.5.** 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

$$K_{т.и} = \frac{T_0 - T_{т.и} - T_{р.}}{T_0} = \frac{8760 - 20 \cdot 24 - 20}{8760} = 0,943.$$

**Ответ:** Коэффициент технического использования равен

$K_{т.и} = 0,943$ , 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.

### Задания для самостоятельной работы

**Задача 3.1.** На промышленные 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.

**Задача 3.2.** На эксплуатацию поставлено 250 изделий. На моменты времени  $t_1 - t_7$  зафиксировано определенное количество отказов (таблица 3.3). Остальные изделия не отказали. Определить средний ресурс.

Таблица 3.3

$t_i$ , час	5 0	1 0 0	1 5 0	2 0 0	2 5 0	3 0 0	3 5 0
$n(t_i)$	5	8	1 1	1 5	2 1	3 1	9

**Задача 3.3.** На промышленные испытания поставлено 3 насоса. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 37 отказа, у второго – 29 отказов, у третьего – 48 отказов. Суммар-

ная наработка до отказа для первого насоса составила 3100 часов, для второго – 2200 часов, для третьего – 2700 часов. Определить средний ресурс насоса.

**Задача 3.4.** Длительность проведения технического обслуживания для бурового насоса составляет 45 часов. Межремонтный цикл составляет 2335 часов. Определить коэффициент готовности бурового насоса.

**Задача 3.5.** Какую длительность восстановления работоспособности должен иметь объект с межремонтным циклом 2000 часов, чтобы коэффициент готовности объекта составлял 0,95.

**Задача 3.6.** Определить среднее время восстановления компрессора, если на проведение 5 мелких ремонтов было затрачено 30,5 часа.

**Задача 3.7.** 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 3.8.** По данным задачи 3.7 определить коэффициент готовности буровой лебедки.

**Задача 3.9.** 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 3.10.** По данным задачи 3.9 определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа за 300 и 600 часов работы.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение средней наработки до отказа и средней наработки на отказ.
2. Какие показатели используются при определении долговечности?
3. Как определяются средний и гамма-процентный ресурс?
4. Как определяются средний и гамма-процентный срок службы?
5. Дайте характеристику показателям ремонтпригодности: вероятности восстановления, интенсивности восстановления, среднему сроку восстановления.
6. Дайте характеристику показателям сохраняемости:

среднему сроку сохраняемости, гамма-процентному сроку сохраняемости.

7. Приведите определение и дайте характеристику коэффициенту готовности.

8. Приведите определение и дайте характеристику коэффициенту оперативной готовности.

9. Приведите определение и дайте характеристику коэффициенту технического использования.

10. Приведите определение и дайте характеристику коэффициенту сохранения эффективности.

### **Практическое занятие № 4.**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

**Цель:** научить студентов определять показатели надежности, которые подчиняются различным законами распределения

### **Задачи обучения:**

- ознакомить с методикой определения единичных и комплексных показателей по статистическим данным для закона нормального распределения, экспоненциального закона и закона Вейбулла;
- привить навыки расчета показателей надежности при различных законах распределения;
- обучить давать характеристику находимых показателей надежности.

### **Задания и методические указания к их выполнению**

Работа студента заключается в изучении методик решении задач, самостоятельном решении заданий и ответах на поставленные контрольные вопросы.

**Пример 4.1.** По результатам наблюдений за работой средняя наработка на отказ равна 2000 часов, среднеквадратическое отклонение 400 часов. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа для значения наработок 1000, 2500 и

3000 часов, закон распределения отказов – нормальный.

**Решение:** Определяем значение квантили нормированного нормального распределения  $U_p$  по формуле (2.14) и соответствующей ей функции Лапласа.

Для наработки 1000 часов квантиль и функция нормированного нормального распределения соответственно

$$U_p = \frac{\tilde{t} - M_t}{\sigma_t} = \frac{1000 - 2000}{400} = -0,25 ;$$

$$\Phi(U_p) = \Phi(-0,25) = 0,4013.$$

Для наработки 2500 часов

$$U_p = \frac{\tilde{t} - M_t}{\sigma_t} = \frac{2500 - 2000}{400} = 1,25 ;$$

$$\Phi(U_p) = \Phi(1,25) = 0,8944.$$

Для наработки 3000 часов

$$U_p = \frac{\tilde{t} - M_t}{\sigma_t} = \frac{3000 - 2000}{400} = 2,5 ;$$

$$\Phi(U_p) = \Phi(2,5) = 0,9938 .$$

Вероятность безотказной работы для показателей подчиняемых закону нормального распределения определяем по формуле (2.12):

$P(t) = \Phi(U_p) = 0,4013 = 0,5987$  – при наработке 1000 часов;

$P(t) = \Phi(U_p) = 0,8944 = 0,1056$ ; – при наработке 2500 часов;

$P(t) = \Phi(U_p) = 0,9938 = 0,0062$  . – при наработке 3000 часов.

Вероятность отказа определяем по формуле (2.15):

$Q(t) = 1 - \Phi(U_p) = 0,4013$  – при наработке 1000 часов;

$Q(t) = 1 - \Phi(U_p) = 0,8944$ ; – при наработке 2500 часов;

$Q(t) = 1 - \Phi(U_p) = 0,9938$ . – при наработке 3000 часов.

**Ответ:** при наработке 1000 часов:  $P(t) = 0,5987$

$Q(t) = 0,4013$ ; при наработке 2500 часов:  $P(t) = 0,1056$ ;

$Q(t) = 0,9938$  при наработке 3000 часов  $P(t) = 0,0062$

0,8944 ;

;

$Q(t)$  x°

0,9938.

**Пример 4.2.** На испытания установлено 100 изделий. Средняя наработка на отказ составила 600 часов, коэффициент вариации ресурса 0,1. Определить количество отказавших изделий при наработке 720 часов.

**Решение.** Так как коэффициент вариации равен 0,1 – закон распределения наработки нормальный.

Находим среднее квадратичное отклонение, выразив его из формулы (2.6),

$$\frac{\sigma_x}{M_x} = 0,1 \Rightarrow \sigma_x = 0,1 \cdot 600 = 60.$$

Для наработки 720 часов квантиль и функция нормированного нормального распределения соответственно равны

$$U_p = \frac{t - M_t}{\sigma_t} = \frac{720 - 600}{60} = 2,0;$$

$$\Phi U_p = \Phi 2,0 = 0,9772.$$

Вероятность отказа при наработке 720 часов определяем по формуле (2.15):

$$Q(t) = \Phi(U_p) = 0,9772.$$

Количество отказов при наработке 720 часов равно

$$n_t = Q_t \cdot N = 0,9772 \cdot 600 = 586,32 \approx 587 \text{ изд.}$$

**Ответ:** 587 изделий.

**Пример 4.3.** Нарботка на отказ испытываемого изделия подчиняется экспоненциальному закону распределения. Интенсивность отказа системы равна  $\lambda = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ . Определить вероятность безотказной работы за время 100 часов работы и среднюю наработку на отказ рассматриваемого изделия.

**Решение:** Вероятность безотказной работы определяется по формуле (2.7)

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 100} = 0,9955.$$

Так как  $\lambda t$  много меньше 0,1, то вероятность безотказной работы можно было определить по приближенной формуле

$$P_t \approx 1 - \lambda t = 1 - 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 1 - 0,0045 = 0,9955.$$

Математическое ожидание средней наработки на отказ определяем по формуле (2.11)



$$M_t \approx \frac{1}{4,5 \cdot 10^5} \approx \frac{1}{22222,2} \text{ час.}$$

**Ответ:**  $P(t) \approx 0,9955$ ;  $M_t \approx \frac{1}{22222,2} \text{ час.}$

### Задания для самостоятельной работы

**Задача 4.1.** 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.

**Задача 4.2.** Предельно допустимое значение ресурса составляет 7000 часов, среднее квадратическое отклонение 1000 часов. Определить средний ресурс, вероятность отказа и вероятность безотказной работы при 5000 часах.

**Задача 4.3.** В результате изучения процесса изнашивания клыка роторного экскаватора установлено, что средняя величина износа соответствует 5 мм, дисперсия 0,01 мм<sup>2</sup>. Какова вероятность того, что найденное значение износа превышает среднее, не более чем на 5 %.

**Задача 4.4.** Средняя наработка на отказ соответствует 1500 часам, коэффициент вариации 0,3. Определить показатели надежности для наработок 1000 часов, 2000 часов, 3000 часов.

**Задача 4.5.** Среднее квадратическое отклонение ресурса равно 400 часам, коэффициент вариации 0,3. Определить показатели надежности для наработок 1000 часов, 2000 часов, 3000 часов.

**Задача 4.6.** 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.

**Задача 4.7.** 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.

**Задача 4.8.** Минимальная наработка на отказ составляет 3000 часов, средняя наработка 1200 часов. Определить количество отказавших изделий при наработке 9000 часов и характеристики надежности.

**Задача 4.9.** Определить вероятность отказа изделия при наработке 1500 часов, если коэффициент вариации равен 0,2, нижнее предельно-допустимое значение наработки составляет 2000 часов.


**Задача 4.10.** Предельно допустимое значение наработки на отказ составляет 1600 часов, максимальное значение 2000 часов. Определить вероятность отказа при наработке 1200 часов и характеристики данного распределения.

**Задача 4.11.** 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.

**Задача 4.12.** 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.

**Задача 4.13.** 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.

**Задача 4.14.** 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.

**Задача 4.15.** 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.

## **Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой закон распределения случайной величины?
2. Для расчета каких показателей и технических систем применяется нормальный закон распределения?
3. Расчет показателей надежности, подчиняющихся нормальному закону распределения.
4. Для расчета каких показателей и технических систем применяется экспоненциальный закон распределения?
5. Расчет показателей надежности, подчиняющихся экспоненциальному закону распределения.
6. Для расчета каких показателей и технических систем применяется закон распределения Вейбулла?
7. Расчет показателей надежности, подчиняющихся закону распределения Вейбулла.
8. Для расчета каких показателей и технических систем применяется гамма-распределение?
9. Расчет показателей надежности, подчиняющихся гамма-распределению.
10. Для расчета каких показателей и технических систем применяется логарифмически нормальное распределение?
11. Расчет показателей надежности, подчиняющихся логарифмически нормальному распределению.

## **Практическое занятие № 5.**

### **ПРИНЦИПЫ УСТАНОВЛЕНИЯ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ**

**Цель:** научить студентов устанавливать законы распределения показателей надежности по статистическим данным

#### **Задачи обучения:**

- ознакомить с методикой установления законов распределения показателя надежности по статистическим данным;

- привить навыки установления закона распределения показателя надежности.

### **Задания и методические указания к их выполнению**

Работа студента заключается в изучении методик решении задач, самостоятельном решении заданий и ответах на поставленные контрольные вопросы.

**Пример 5.1** На основе представленных статистических данных провести расчет и анализ показателей надежности серии невосстанавливаемых объектов.

**Исходные данные:**

Таблица 5.1

#### **Данные об отказах оборудования**

№ об- ъект а	Врем я набл ю- дения	Время отказа, час	Чис ло отк а- зов
1	115 0	155, 291, 340, 396, 900, 1145	6
2	199 0	90, 180, 460, 853, 1761, 1987	6
3	302 0	420, 930, 1213, 1916, 2005, 2774, 3015	7
4	360 0	300, 830, 1430, 1933, 2247, 2968, 3220, 3561	8
5	225 0	301, 610, 1700, 1900, 2100, 2250	6
6	300 0	68, 415, 888, 1231, 1717, 1917, 2090, 2967	8
7	289 8	87, 211, 715, 1600, 1903, 2115, 2344, 2898	8
8	205 0	60, 280, 395, 470, 850, 1050, 2000	7
9	135 0	50, 158, 484, 945, 1120, 1300	6
1	255	81, 240, 793, 1145, 1781, 1973, 2005,	8

0	0	2500	
---	---	------	--

### **Решение.**

1 Получение простого статистического ряда

Определяем наработку до отказа по всем объектам. Для этого из каждого последующего времени возникновения отказа вычитаем предыдущее. Для удобства расчетов данные представляем в виде таблицы 5.2.

Выстраиваем полученные данные в порядке возрастания. Находим максимальное и минимальное значение из полученного простого статистического ряда.

$$T_{\min} \times 32 \text{ ч}$$

$$T_{\max} \times 1090 \text{ ч}$$

Определяем диапазон значений или амплитуду статического ряда.

$$\frac{1}{T_{\max}} \sim T_{\min} \times 1090 \sim 32 \times 1058 \text{ ч}$$

Таблица 5.2

### Нахождение значений наработки на отказ

№ изделия	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1 5 5	1 3 6	49	56	504	2 4 5		
2	9 0	9 0	28 0	393	908	2 2 6		
3	4 2 0	5 1 0	28 3	703	89	7 6 9	241	
4	3 0 0	5 3 0	60 0	503	314	7 2 1	252	3 4 1
5	3 0 1	3 0 9	10 90	200	200	1 5 0		
6	6 8	3 4 7	47 3	343	486	2 0 0	173	8 7 7
7	8 7	1 2 4	50 4	885	303	2 1 2	229	5 5 4
8	6 0	2 2 0	11 5	75	380	2 0 0	950	
9	5 0	1 0 8	32 6	461	175	1 8 0		
10	8 1	1 5	55 3	352	636	1 9	32	4 9

		9				2		5
--	--	---	--	--	--	---	--	---

## 2 Обработка статистического ряда

Количество данных равно 70. Определяем количество интервалов.

$$N \approx 70$$

$$k \approx \sqrt[3]{N} \approx \sqrt[3]{70} \approx 8$$

Определяем длину интервала

$$T = \frac{\sum x_i}{k} = \frac{1058}{8} \approx 132,25 \approx 140 \text{ ч}$$

Рассчитываем частоту и накопленную частоту по всем интервалам. Данные сводим в таблицу 5.3.

## 3 Расчет показателей безотказности по статистическим данным

Определяем количество работоспособных изделий на середину каждого периода по формуле

$$N_t \approx \tilde{N}_{.nt}$$



Определяем статистическую оценку вероятности безотказной работы на середину каждого периода по формуле

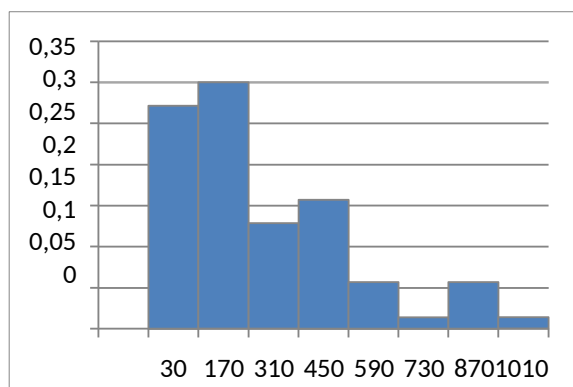
$$R_t = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta n_i}{N}$$

Таблица 5.3

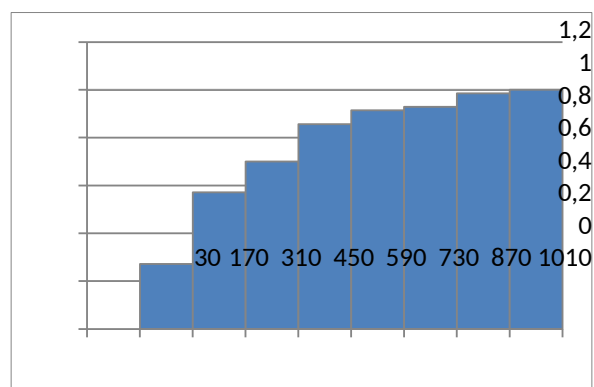
**Расчет частоты и накопленной частоты**

Но ин- терва ла	Начал о интерв а- ла в час.	Конец интерв а- ла в час.	Кол-во изд. от- казав. в интерв а- ле, $\Delta n_i(\Delta t_i)$	Ча- стост ь, $\Delta n(\Delta t)/N$	Накоплен - ная ча- стость, $\Sigma(\Delta n(\Delta t)/N)$
1	30	17 0	19	0,27	0, 27
2	17 0	31 0	21	0,30	0, 57
3	31 0	45 0	9	0,13	0, 70
4	45 0	59 0	11	0,16	0, 86
5	59 0	73 0	4	0,06	0, 91
6	73 0	87 0	1	0,01	0, 93
7	87 0	10 10	4	0,06	0, 99
8	10 10	11 50	1	0,01	1, 00
			$\Sigma=70$	$\Sigma=1,00$	

Строим гистограммы по полученным значениям частоты и накопленной частоты



**Рис. 5.1. Гистограмма частоты**



**Рис. 5.2. Гистограмма накопленной частоты**

Определяем количество отказавших деталей нарастающим итогом на середину каждого периода по формуле

$$n_{t,i} = n_t \cdot F_t$$

Определяем статистическую оценку вероятности отказа на середину каждого периода по формуле

$$Q(t) = \frac{n_t}{N}$$

Определяем статистическую оценку плотности вероятности отказов по формуле

$$f(t) = \frac{n_t}{N \cdot \Delta t}$$

Результаты расчета для удобства сводим в таблицу 5.4

Таблица 5.4

### Расчет показателей безотказности по экспериментальным данным

Начало интервала	Конец интервала	Середина интервала	Количество отказавших изделий в интервале	Количество отказавших изделий на середину	Количество работоспособных изделий на середину	R(t)	Q(t)	f(t)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	17	10	1	9,	60,5	0,	0,	0,000
	0	0	9	5		86	14	97
17	31	24	2	29	40,5	0,	0,	0,003
0	0	0	1	,5		58	42	01
31	45	38	9	44	25,5	0,	0,	0,004
0	0	0		,5		36	64	54
45	59	52	1	54	15,5	0,	0,	0,005
0	0	0	1	,5		22	78	56
59	73	66	4	62	8	0,	0,	0,006
0	0	0				11	89	33
73	87	80	1	64	5,5	0,	0,	0,006
0	0	0		,5		08	92	58
87	10	94	4	67	3	0,	0,	0,006

0	10	0				04	96	84
10	11	10	1	69	0,5	0,	0,	0,007
10	50	80		,5		01	99	09

Строим график зависимости вероятности безотказной работы  $R(t)$  и вероятности отказа  $Q(t)$  по экспериментальным данным.

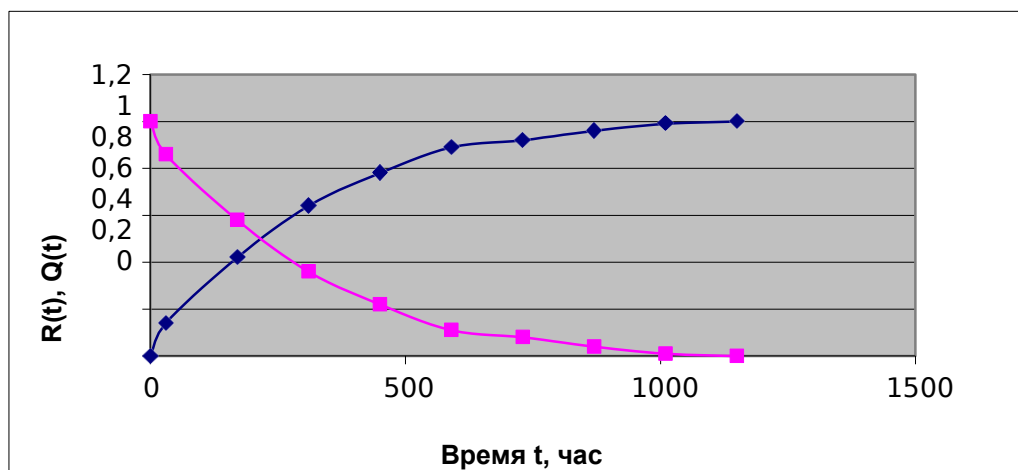
#### 4 Расчет числовых характеристик наработки до отказа.

Средняя наработка до отказа определяется по формуле:

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{\sum n_i \cdot t_{i\text{ср}}}{N},$$

где  $n_i$  – количество отказов изделий в рассматриваемом интервале;

$t_{i\text{ср}}$  – середина рассматриваемого интервала.



**Рис. 5.3. График зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от времени**

Таблица 5.5

**Промежуточные расчеты средней наработки до отказа**

Середина интервала	Кол-во изд. отказав. в интервале	$t_{\text{ср}} \cdot n_i$	$t_{\text{ср}}^2 \cdot n_i$
100	1 9	1900	190000
240	2 1	5040	1209600
380	9	3420	1299600
520	1 1	5720	2974400
660	4	2640	1742400
800	1	800	640000
940	4	3760	3534400
1080	1	1080	1166400
		$\Sigma=24360$	$\Sigma=12756800$

Дисперсия:

$$D_{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n t_i)^2}{N}}{N} = \frac{12756800 - \frac{348^2}{70}}{70} = 61136.$$

$$\sqrt[3]{1136} \approx 10,42; \\ t = \frac{247}{348} \approx 0,71.$$

5 Выбор закона распределения и его параметры.

Выдвигаем гипотезу по закону распределения средней наработки до отказа. Если  $v > 0,5$ , то данная случайная величина подчиняется закону Вейбулла. В данном случае  $0,71 > 0,5$ , следовательно, выбираем закон распределения Вейбулла).

Основная гипотеза  $H_0$  – средняя наработка до отказа подчинена закону Вейбулла.

Основная гипотеза  $H_1$  – средняя наработка до отказа не подчинена закону Вейбулла.

Определяем характеристики закона распределения Вейбулла: коэффициент формы и масштаба. Воспользуемся номограммой на рисунке 5.4.

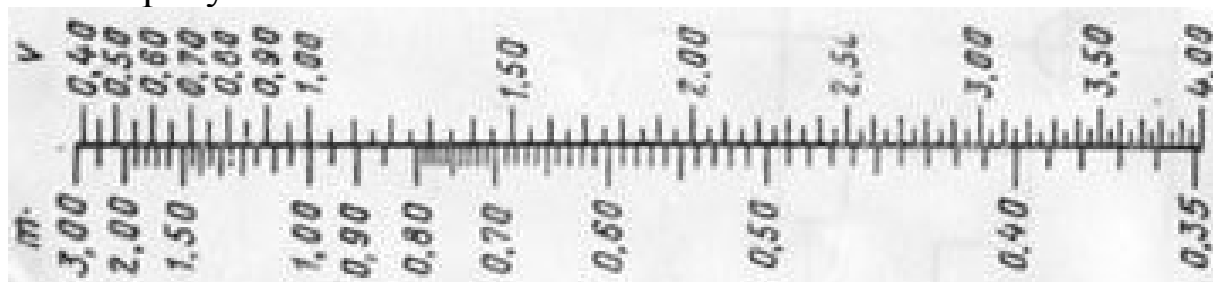


Рис. 5.4. Номограмма для определения параметра закона Вейбулла

По рисунку 5.4 определяем параметр  $\alpha$  для соответствующего значения  $v$ , при  $v=0,71$  будет  $\alpha=1,47$ .

Рассчитаем параметр  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{1}{t^\alpha} = \frac{1}{348^{1,4}} \approx 0,0001836$$

Простая гипотеза  $H_0$  – средняя наработка до отказа подчиняется закону Вейбулла с параметрами:  $\alpha=1,47$ ;  $\lambda=0,0001836$ .

6 Подтверждение гипотезы

Для подтверждения гипотезы используем критерий согласия Пирсона ( $\chi^2$ ), который характеризует отклонение теоретической кривой от практической

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n_{теор})^2}{n_{теор}};$$

При расчете необходимо объединить интервалы с количеством данным менее 5.

Расчет ведем для 5-ти интервалов:

$$n_{imeo} \times P_{im} \nabla N, \text{ где}$$

$P_{im}$  вероятность попадания в интервал от  $t_i$  до  $t_{i+1}$ ;

$$P_{im} \times e^{-\frac{t_i - t_{i-1}}{\tau}} e^{-\frac{t_{i+1} - t_i}{\tau}}$$

Результаты расчета представляем в таблице 5.6.

Таблица 5.6

Начало интервала	Конец интервала	Середина интервала	Количество изделий от- казавшихся в интервале	Pit	nit	ni-nit	(ni-nit) <sup>2</sup>	(ni-nit) <sup>2</sup> /nit
30	170	100	1 9	0,294	20, 61	- 1,61	2,6 1	0,13
170	310	240	2 1	0,275	19, 28	1,72	2,9 7	0,15
310	450	380	9	0,198	13, 84	- 4,84	23, 41	1,69
450	590	520	1 1	0,119	8,3 0	2,70	7,2 9	0,88
590	730	660	4	0,063	4,3 8	- 0,38	0,1 5	0,03
730	870	800	1	0,030	2,0 9	- 1,09	1,1 9	0,57
870	101 0	940	4	0,013	0,9 1	3,09	9,5 3	10,43
101 0	115 0	1080	1	0,005	0,3 7	0,63	0,4 0	1,07
				Σ=0,9 97				χ <sup>2</sup> =14, 95

χ<sup>2</sup> расчетное равно 14,95. Сравним χ<sup>2</sup> расчетное с теоретическим:

$$\chi_{теор}^2(r, \alpha), \text{ где}$$

$r$  кол-во степеней свободы;

$\alpha$  кол-во вероят. ошибки 1-го рода ( $\alpha=0,05;0,01$ );



$r \leq \tilde{k} \leq \tilde{s} - 1 \leq \tilde{b} - 1 \leq 5$ , где

$\tilde{s}$  кол-во наложенных связей ( $s \leq 0$ );

$\tilde{k}$  кол-во интервалов.

$$\chi^2_{теор}(5; 0, 01) \leq 15, 09 ,$$

$14,95 < 15,09$  , следовательно, т.к.  $\chi^2$  расчетное  $< \chi^2$  теор. – гипотеза верна, отклонения меньше допустимых, т.е. наработка до

отказа подчиняется закону Вейбулла с такими параметрами.

7 Расчет показателей безотказности по теоретическим данным.

$$M(x) = \frac{\Gamma(1/1,47)}{\Gamma(1/1,47)} = 1,47 \cdot 0,0001836^{1/1,47} \approx 314,86$$

по табл.  $\Gamma(1/1,47) \approx 1,33$ ;

$$D(x) = \frac{2 \cdot \Gamma(2/1,47) \cdot \Gamma(1/1,47)^2}{1,47 \cdot 0,0001836^{1/1,47}} = \frac{2 \cdot 1,47 \cdot 0,89 \cdot 1,33^2}{1,47 \cdot 0,0001836^{1/1,47}} \approx 200,68$$

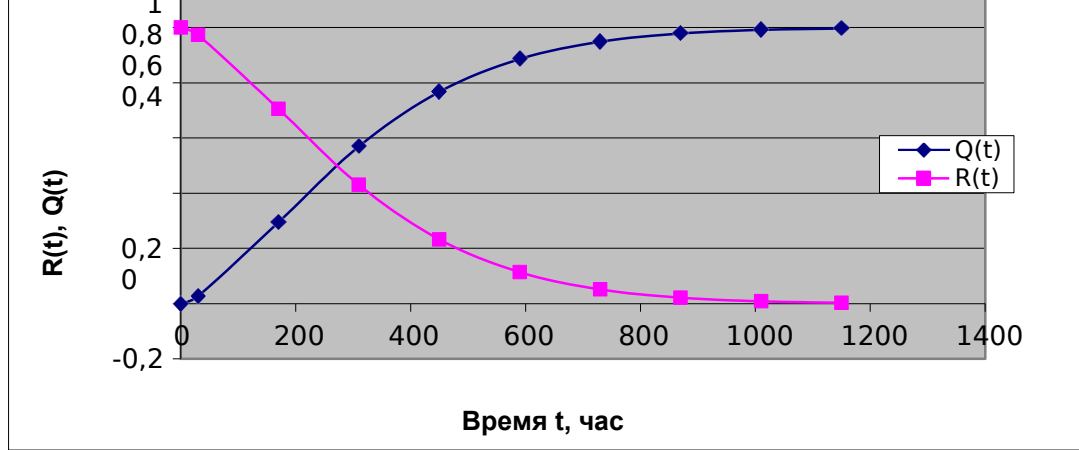
$$f(t) = \frac{1}{t} e^{-t^{1,47}};$$

$$R(t) = e^{-t^{1,47}};$$

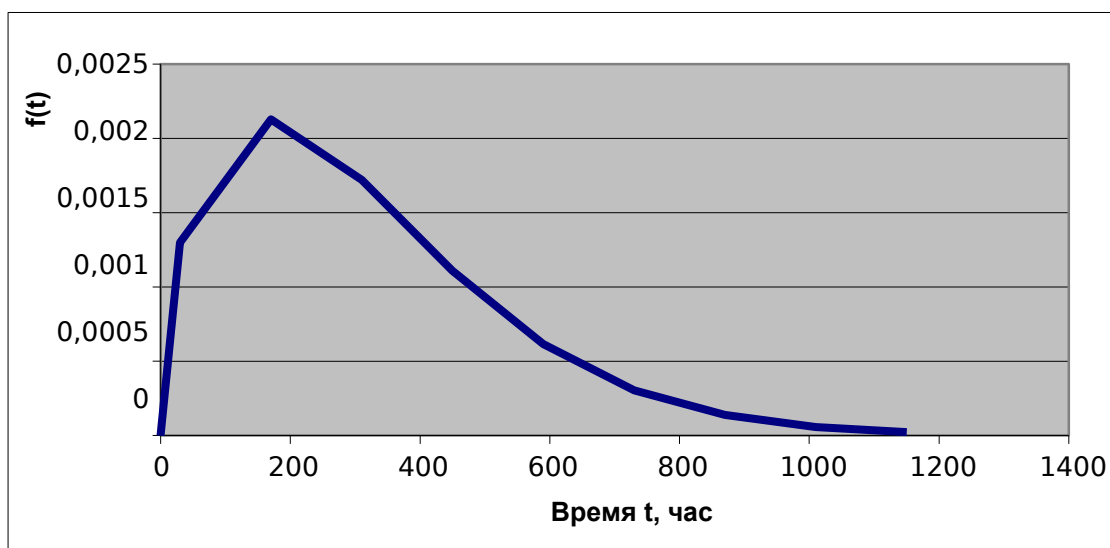
$$Q(t) = 1 - e^{-t^{1,47}}.$$

Таблица 5.7

ti	f(t)	R(t)	Q(t)
0	0	1	0
30	0,00129 90	0,9 73	0,0 27
170	0,00212 81	0,7 06	0,2 94
310	0,00172 08	0,4 30	0,5 70
450	0,00110 79	0,2 32	0,7 68
590	0,00061 64	0,1 14	0,8 86
730	0,00030 65	0,0 51	0,9 49
870	0,00013 89	0,0 21	0,9 79
101 0	0,00005 80	0,0 08	0,9 92
115 0	0,00002 25	0,0 03	0,9 97



**Рис. 5.5. График теоретической зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от времени**



**Рис. 5.6. График теоретической зависимости плотности распределения отказов во времени**

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое случайная величина?
2. Какие события являются случайными?
3. Приведите примеры дискретных случайных величин, рассматриваемых в теории надежности.
4. Приведите примеры непрерывных случайных величин, рассматриваемых в теории надежности.
5. Какой вид имеет функция распределения случайной величины?
6. Что такое плотность распределения, математическое ожидание, дисперсия случайной величины, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации, квантиль, медиана, мода?
7. Что такое статистический ряд?
8. Порядок обработки статистического ряда.
9. Что такое статистическая гипотеза?
10. Для чего применяется критерий согласия?
11. Что такое ошибки первого и второго рода?

## Практическое занятие № 6.

### РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**Цель:** научить студентов определять показатели надежности объектов, представляющих сложные системы.

**Задачи обучения:**

- ознакомить с методами резервирования;
- привить навыки построения структуры сложной системы;
- научить рассчитывать показатели надежности системы без резервирования;
- научить рассчитывать показатели надежности системы с резервированием.

**Задания и методические указания к их выполнению**

Работа студента заключается в изучении методик решения задач, самостоятельном решении заданий и ответах на поставленные контрольные вопросы.

**Пример 6.1.** Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа основной системы, состоящей из пяти элементов, если вероятности безотказной работы элементов равны  $P_1(t)=0,98$ ,  $P_2(t)=0,97$ ,  $P_3(t)=0,99$ ,  $P_4(t)=0,98$ ,  $P_5(t)=0,96$ .

**Решение:** вероятность безотказной работы системы  $P_c(t)$  определяем по формуле (3.1):

$P_c(t) \approx P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_5(t) \approx 0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,96 \approx 0,885$ , вероятность отказа  $Q_c(t)$  системы определяется по формуле (3.5):

$$Q_c(t) \approx 1 - P_c(t) \approx 1 - 0,885 \approx 0,115.$$

**Ответ:**  $P_c(t) \approx 0,885$   $Q_c(t) \approx 0,115$ .

**Пример 6.2.** 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 по формуле (2.11)

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{40} = 0,0025 \text{ 1/час}; \quad \lambda_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{20} = 0,005 \text{ 1/час};$$

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

Интенсивность отказа системы определяем по формуле (3.7)

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

Наработку до отказа системы рассчитаем по формуле (3.8)

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

**Ответ:**  $\bar{T}$

$$T = 105,3 \text{ час}.$$

**Пример 6.3.** Система состоит из трех элементов, вероятность безотказной работы которых в течении 100 часов равны  $P_1(100) = 0,95$ ;  $P_2(100) = 0,99$ ;  $P_3(100) = 0,97$ . Найти среднее время безотказной работы системы, закон распределения – экспоненциальный.

**Решение:** Определим вероятность безотказной работы системы

$$P(100) = P_1(100) \cdot P_2(100) \cdot P_3(100) = 0,95 \cdot 0,99 \cdot 0,97 = 0,912.$$

Выразим интенсивность отказа системы из формулы (3.6)

$$\lambda = \frac{-\ln P(t)}{t} = \frac{-\ln 0,912}{100} = 0,0092.$$

Среднее время безотказной работы системы определяем по формуле (3.8)

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,0092} = 1085,6 \text{ час}.$$

**Ответ:**  $T = 1085,6 \text{ час}.$

**Пример 6.4.** Система состоит из 6000 элементов, средняя интенсивность отказов которых  $\lambda_{cp} = 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ 1/час}$ . Определить вероятность безотказной работы, вероятность отказа, плотность вероятности времени безотказной работы за время 100 часов, и

среднее время безотказной работы.

**Решение:** Интенсивность отказов системы определяем по формуле (3.7)

$$\lambda_i = \frac{n}{n_{\text{ср}} \cdot 10^7} = \frac{6000}{5,4 \cdot 10^3} = 3,24 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность безотказной работы рассчитаем по формуле (3.6)

$$P_t = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-0,00324 \cdot 100} = 0,72,$$

Вероятность отказа системы

$$Q_t = 1 - P_t = 1 - 0,72 = 0,28.$$

Наработка до отказа системы

$$T = \frac{1}{3,24 \cdot 10^3} = 308,6 \text{ час.}$$

■

Плотность вероятности времени безотказной работы

$$f_t = \lambda e^{-\lambda t} = 3,24 \cdot 10^3 \cdot e^{-3,24 \cdot 10^3 \cdot 100} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ 1/час.}$$

### Задания для самостоятельной работы студентов

**Задача 6.1.** Определить вероятность безотказной работы системы, состоящей из 500 элементов, если вероятность безотказной работы каждого элемента в течение времени  $t$  равна  $P(t) = 0,998$ .

**Задача 6.2.** Вероятность безотказной работы системы, состоящей из 150 равнонадежных элементов, в течение времени  $t$  равна  $P_c(t)=0,95$ . Найти вероятность безотказной работы элемента.

**Задача 6.3.** 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.

**Задача 6.4.** 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.

**Задача 6.5.** 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.

**Задача 6.6.** Установка состоит из 3000 элементов, средняя интенсивность отказов которых  $3,8 \cdot 10^{-6}$  1/час. Определить веро-

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

**Задача 6.7.** 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.

**Задача 6.8.** 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.

### Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику сложной системы.
2. Как рассчитываются показатели надежности системы без резервирования (основной системы)?
3. Что такое резервирование?
4. Какие используются виды резервирования?
5. Дайте определение и характеристику общему и поэлементному резервированию.
6. Дайте определение и характеристику постоянному резервированию и резервированию замещением.
7. Дайте определение и характеристику резервированию с восстановлением и без восстановления.

## Практическое занятие № 7.

### ОТКАЗЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Цель:** освоить методику определения отказов и предельных состояний технических систем

**Задачи обучения:**

- ознакомить с критериями отказов и технических состояний нефтегазового оборудования;
- научить выявлять основные виды отказов оборудования;
- привить навыки определения работоспособности объектов.

**Задания и методические указания к их выполнению**

Работа студента заключается в изучении методик решения задач, самостоятельном решении заданий и ответах на поставленные контрольные вопросы.

**Задача.** Провести анализ видов, последствий и критичности отказов запорной арматуры.

Анализ видов и последствий отказов (АВПО) – формализованная, контролируемая процедура качественного анализа проекта, технологии изготовления, правил эксплуатации и хранения, системы технического обслуживания и ремонта изделия, заключающаяся в выделении на некотором уровне разукрупнения его структуры возможных (наблюдаемых) отказов разного вида, в прослеживании причинно-следственных связей, обуславливающих их возникновение, и возможных (наблюдаемых) последствий этих отказов на данном и вышестоящих уровнях, а также – в качественной оценке и ранжировании отказов по тяжести их последствий. Анализ видов, последствий и критичности отказов (АВПКО) – процедура АВПО, дополненная оценками показателей критичности анализируемых отказов.

*Методика проведения АВПКО:*

1. выявляют возможные виды отказов составных частей и изделия в целом, изучают их причины, механизмы и условия возникновения и развития;

2. определяют возможные неблагоприятные последствия возникновения выявленных отказов, проводят качественный анализ тяжести последствий отказов и/или количественную оценку их критичности;

3. составляют и периодически корректируют перечни критичных элементов и технологических процессов;

4. оценивают достаточность предусмотренных средств и методов контроля работоспособности и диагностирования изделий для своевременного обнаружения и локализации его отказов, обосновывают необходимость введения дополнительных средств и методов сигнализации, контроля и диагностирования;

5. вырабатывают предложения и рекомендации по внесению изменений в конструкцию и/или технологию изготовления изделия и его составных частей, направленные на снижение вероятности и/или тяжести последствий отказов, оценивают эффективность ранее проведенных доработок;

6. оценивают достаточность предусмотренных в системе технологического обслуживания контрольно-диагностических и профилактических операций, направленных на предупреждение отказов изделий в эксплуатации, вырабатывают предложения по корректировке методов и периодичности технического обслуживания;

7. анализируют правила поведения персонала в аварийных ситуациях, обусловленных возможными отказами изделий, предусмотренные эксплуатационной документацией, вырабатывают предложения по их совершенствованию или внесению соответствующих изменений в эксплуатационную документацию при их отсутствии;

8. проводят анализ возможных (наблюдаемых) ошибок персонала при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте изделий, оценивают их возможные последствия, вырабатывают предложения по совершенствованию человеко-машинных интерфейсов и введению дополнительных средств защиты изделий от ошибок персонала, по совершенствованию инструкций по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту изделий.

## **Методика выполнения работы на примере анализа отказов шиберной задвижки, установленной в газораспределительной системе**

1. По нормативно-технической документации определяем виды отказов и предельных состояний для рассматриваемого объекта.

Критерии предельного состояния и возможные виды их отказов, являющиеся общими для всех типов арматуры, устанавливаются СТО Газпром 2-4.1-212-2008. К ним относятся:

- начальная стадия нарушения целостности корпусных деталей (газовая течь);
- изменение геометрических форм поверхностей корпусных деталей свыше допустимых как следствие эрозионного и коррозионного разрушений, препятствующих нормальному функционированию арматуры.

К возможным отказам, характерным для всех типов арматуры, относятся:

- потеря герметичности по отношению к внешней среде по корпусным деталям, связанная с разрушением;
- потеря герметичности по отношению к внешней среде по прокладочным соединениям, уплотнениям и в трубной обвязке;
- невыполнение функций «открытия-закрытия»;
- потеря герметичности в затворе (сверх допустимых пределов, указанных в эксплуатационной документации).

Критерии отказов шиберных задвижек:

1 Потеря герметичности по отношению к внешней среде по корпусным деталям:

- а) разрушение, с выбросом рабочей среды в атмосферу;
- б) разрушение уплотнительных поверхностей корпусных деталей;
- в) потение, капельная течь.

2 Потеря герметичности по отношению к внешней среде по сальниковому уплотнению:

- а) разрушение сальника, с выбросом рабочей среды в атмосферу;
- б) потеря герметичности в сальнике, не устранимая подтяжкой.

3 Потеря герметичности по отношению к внешней среде по неподвижным соединениям:

- а) разрушение уплотнительного элемента;
- б) потеря герметичности, устранимая подтяжкой.

4 Потеря герметичности в затворе сверх допустимых пределов, указанных в эксплуатационной документации.

5 Невыполнение функции «закрыто».

6 Невыполнение функции «открыто».

Критериями предельного состояния задвижек являются:

- начальная стадия нарушения целостности корпусных деталей (потение, капельная течь);
- достижение назначенных показателей;
- разрушение основного материала и сварных соединений корпусных деталей;
- изменения геометрических размеров и состояния поверхностей внутренних деталей, в том числе и корпусных, влияющих на функционирование задвижек, в результате эрозионного, коррозионного и кавитационного разрушений;
- превышение крутящего момента, необходимого для открытия (закрытия) задвижек более чем на 10%, приводящее к срабатыванию муфт ограничения крутящих моментов электропривода.

Критерии предельного состояния электроприводов указаны в нормативно-технической документации на электропривода.

*Для дальнейшего анализа возьмем один из критериев отказа шибберной задвижки – потеря герметичности в затворе сверх допустимых пределов, указанных в эксплуатационной документации в результате газообразивного износа уплотнительных поверхностей.*

2. Установление категории тяжести последствий отказов

Тяжесть последствий отказов устанавливается на основе анализа категории по таблице 7.1.

Принимаем категорию тяжести II, так как рассматриваемый вид отказа не приводит к значительному ущербу для самого объекта или для окружающей среды.

3. Определяем тяжесть последствий отказа

Определяем тяжесть последствий по таблице

7.2.

Таблица 7.1

Категория тяжести последствий отказов	Характеристика тяжести последствий отказов
IV	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей, срыв выполнения поставленной задачи
III	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или для окружающей среды, срыв выполняемой задачи, но создает пренебрежимо малую угрозу жизни и здоровью людей
II	Отказ, который может повлечь задержку выполнения задачи, снижение готовности и эффективности объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей
I	Отказ, который может повлечь снижение качества функционирования объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей

Ранги отказов:

А - обязателен углубленный количественный анализ критичности,

В - желателен количественный анализ критичности,

С - можно ограничиться качественным анализом,

Д - анализ не требуется.

Износ затвора является вероятным отказом, поэтому для шиберных задвижек характерен ранг А или В, поэтому необходим количественный анализ критичности.



#### 4. Анализ качественной оценки частоты отказов

Анализ качественной оценки частоты отказов проводится в соответствии с таблицей 7.3.

Таблица 7.2

**Матрица «Вероятность отказа - тяжесть последствий»  
для ранжирования отказов при АВПО**

Ожидаемая частота возникновения	Тяжесть последствий			
	Катастрофически отказ (категория IV)	Критически отказ (категория III)	Некритический отказ (категория II)	Отказ с пренебрежимо малыми последствиями (категория I)
Частый отказ	A	A	A	C
Вероятный отказ	A	A	B	C
Возможный отказ	A	B	B	D
Редкий отказ	A	B	C	D
Практически невероятный отказ	B	C	C	D

Таблица 7.3

**Качественные оценки частоты отказов**

Виды отказов по частоте	Качественное описание частоты	
	для индивидуального изделия	для совокупности изделий
Частый отказ	Вероятно частое возникновение	Наблюдается постоянно
Вероятный отказ	Будет наблюдаться несколько раз за срок службы изделия	Вероятно частое

Возможный отказ		<p>лия</p> <p>Возможно одно наблюдение данного отказа за срок службы</p>	<p>возникновение</p> <p>Наблюдается сколько раз</p>
Редкий отказ	Очень редко	<p>Отказ маловероятен, но возможен хотя бы раз за срок службы</p>	<p>Вполне возможен хотя бы один раз</p>
Практически невероятный отказ		<p>Отказ настолько маловероятен, что вряд ли будет наблюдаться даже один раз за срок службы</p>	<p>Отказ маловероятен, но возможен хотя бы один раз</p>

Износ шибера происходит несколько раз за срок службы изделия, поэтому данный вид отказа является вероятным.

#### 5. Определение балльных оценок критичности отказов

Критичность отказа  $C$  рассчитывают как произведение  $C = B1 \cdot B2 \cdot B3$ , входящие в которое сомножители оценивают в баллах с использованием таблиц 7.4-7.6.

Таблица 7.4

#### Оценки вероятностей отказов в баллах B1

Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов, оцененная расчетом или экспериментным путем	Оценка вероятности отказа в баллах B1
Отказ практически не вероятен	Менее 0,00005	1
Отказ маловероятен	От 0,00005 до 0,001	2
Отказ имеет малую вероятность, обусловленную только точностью расчета	От 0,001 до 0,005	3
Умеренная вероятность отказа	От 0,005 до 0,01	4
Отказы возможны, но при испытаниях или в эксплуатации аналогичных изделий не наблюдались	От 0,01 до 0,05	5
Отказы возможны, наблюдались при испытаниях и в эксплуатации аналогичных изделий	От 0,05 до 0,1	6
Отказы вполне вероятны	От 0,1 до 0,5	7

Высокая вероятность отказов	От 0,01 до 0,10	8
Вероятны повторные отказы	Более 0,11	10

Таблица 7.5

**Оценки последствий отказов В2**

Описание последствий отказов	Оценка в баллах В2
Отказ не приводит к заметным последствиям, по- требитель вероятно не обнаружит наличие неис- правности	1
Последствия отказа незначительны, но потребитель может выразить недовольствие его появлением	2-3
Отказ приводит к заметному для потребителя сни- жению эксплуатационных характеристик и/или к неудобству применения изделия	4-6
Высокая степень недовольства потребителя, изде- лие не может быть использовано по назначению, но угрозы безопасности отказ не представляет	7-8
Отказ представляет угрозу безопасности людей или окружающей среды	9-10

Таблица 7.6

**Оценка вероятности обнаружения отказа  
до поставки изделия потребителю В3**

Виды отказов по вероятно- сти обнаружения до постав- ки	Вероятность обнару- жения отказа, оценен- ная расчетным или экспертным путем	Оцен ка вероя т- ности в балла х
Очень высокая вероятность выявления отказа при кон- троле, сборке, испытаниях	Более 0,95	1

Высокая вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	От 0,95 до 0,85	2-3
Умеренная вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	От 0,85 до 0,45	4-6
Высокая вероятность поставки потребителю дефектного изделия	От 0,45 до 0,25	7-8
Очень высокая вероятность поставки потребителю дефектного изделия	Менее 0,25	9-10

Критичность отказа  $C=4 \cdot (7-8) \cdot 1=28-32$

6. Оформление рабочего листа для проведения АВПО  
Оформление производится по форме, представленной в таблице 7.7.

Таблица 7.7

**Форма рабочего листа для проведения АВПО**

1	2	3	4	Послеств ия отказа			8	9	10
				на рассматриваемом уровне	на вышестоящем уровне	на уровне изделия			
	Наименование элемента (функции)	Вид (описание) отказа	Возможные причины отказа				Способы и средства обнаружения и показаний отказа	Рекомендации по предупреждению (снижению) тяжести последствий отказа	Категория тяжести последствий отказа
	Затвор шиберной задвижки	Износ уплотнительной поверхности	Газоабразивное изнашивание и изнашивание при трении металл	Потеря перекачиваемого продукта	Нарушение работоспособности газораспределительной системы	Потеря работоспособности	Диагностика утечки среды	Своевременное выявление отказа	А или В



## **Контрольные вопросы**

1. Какие признаки положены в основу классификации отказов?
2. Дайте определения постепенным и внезапным отказам.
3. Приведите классификацию отказов по причинам возникновения.
4. Какие законы используются для построения модели постепенных отказов?
5. Какие законы используются при построении модели внезапных отказов?
6. Какие отказы характерны для деталей и узлов нефтегазового оборудования?
7. Какие физические явления приводят к отказам технических систем?

## **Практическое занятие № 8.**

### **МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Цель:** получить навыки определять метод повышения надежность технической системы и его характеристики.

#### **Задачи обучения:**

- ознакомить с методами повышения надежность технических систем;
- привить навыки определения показателей надежности технических систем с резервированием;
- обучить давать характеристику разновидностей резервирования.

#### **Задания и методические указания к их выполнению:**

Работа студента заключается в изучении методик решения задач, самостоятельном решении заданий и ответах на поставленные контрольные вопросы.

## *Краткие сведения из теории*

Для повышения надежности систем и элементов применяют резервирование, основанное на использовании того или иного вида избыточности. Последняя определяет следующие разновидности резервирования: *функциональное, временное, информационное, структурное*.

В том случае, если различные системы или устройства выполняют близкие функции, осуществляется *функциональное* резервирование. Такое резервирование часто применяют для многофункциональных систем.

*Временное* резервирование заключается в том, что допускается перерыв функционирования системы или устройства из-за отказа элемента. Во многих случаях временное резервирование, обеспечивающее непрерывность технологического процесса, осуществляется за счет введения аккумулирующих емкостей, складов сырья и полуфабрикатов.

*Информационное* резервирование связано с возможностью компенсации потери информации по одному каналу информацией по другому. На большинстве технологических объектов, благодаря внутренним связям, имеет место информационная избыточность, которая часто используется для оценки достоверности информации.

Для локальных систем наиболее характерно структурное резервирование. При использовании последнего повышение надежности достигается путем введения дополнительных элементов в структуру системы.

*Структурное* резервирование разделяют на общее и поэлементное (раздельное). В первом случае система или устройство резервируется в целом, во втором резервируются отдельные элементы или их группы.

Если резервные элементы функционируют наравне с основными, то имеет место нагруженное резервирование.

Если резерв вводится в состав системы после отказа основного элемента, то имеет место ненагруженное резервирование.

При резервировании замещением один и тот же резерв может быть использован для замены любого из ряда однотипных элементов. Такой способ резервирования называют скользящим или с неоднозначным соответствием.

Простейшим вариантом расчета надежности систем со структурной избыточностью является определение показателей безотказности систем, содержащих резервированные невосстанавливаемые элементы.

**Пример 8.1.** Система состоит из трех элементов с равной вероятностью безотказной работы равной 0,9. Определить вероятности безотказной работы системы при различных вариантах резервирования.

**Решение:** а) расчет показателей надежности системы без резервирования:

Вероятность безотказной работы системы без резервирования определяется по формуле (2.1):

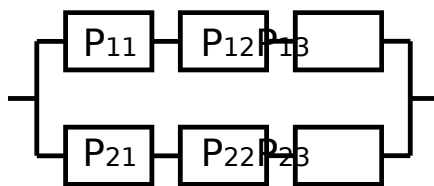
$$P_{ct} \approx P_t^3 \approx 0,9^3 \approx 0,729,$$

Вероятность отказа системы без резервирования определяем по формуле (2.5)

$$Q_{ct} \approx 1 - \prod_{i=1}^n P_{i,t} \approx 1 - 0,9^3 \approx 1 - 0,729 \approx 0,271.$$

б) расчет показателей надежности системы при общем резервировании:

Структурная схема системы с общим резервированием показана на рисунке 8.1.



$P_{11}, P_{12}, P_{13}$  – вероятности безотказной работы элементов основной системы;  $P_{21}, P_{22}, P_{23}$  – вероятности безотказной работы элементов резервной системы

**Рис. 8.1. Схема системы с общим резервирование**

Вероятность отказа системы с общим резервированием определяется по формуле (2.6):

$$Q_{ct} \approx Q_{OCt} \vee Q_{PCt},$$

где  $Q_{OC}(t)$  – вероятность отказа основной системы;

$Q_{PC}(t)$  – вероятность отказа резервной системы.

Вероятность отказа основной системы определяем по формуле (2.5)

$$Q_{OCT} \approx 1 - \prod_{i=1}^n P_{i,t} \approx 1 - 0,9^3 \approx 1 - 0,729 \approx 0,271.$$

Вероятность отказа резервной системы равна

$$Q_{PC,t} \approx 1 - \prod_{i=1}^n P_{i,t} \approx 1 - 0,9^3 \approx 1 - 0,729 \approx 0,271.$$

Вероятность отказа системы:

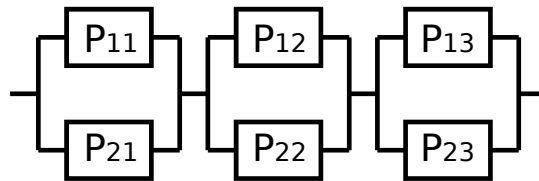
$$Q_{ct} \approx Q_{OCT} \vee Q_{PC,t} \approx 0,271 \vee 0,271 \approx 0,073.$$

Вероятность безотказной системы с общим резервированием определяем по формуле (2.8)

$$P_{ct} \approx 1 - Q_{ct} \approx 1 - 0,073 \approx 0,927.$$

в) расчет показателей надежности системы при поэлементном резервировании:

Структурная схема системы с поэлементным резервированием показана на рисунке 8.2.



$P_{11}, P_{12}, P_{13}$  – вероятности безотказной работы основных элементов;  
 $P_{21}, P_{22}, P_{23}$  – вероятности безотказной работы резервных элементов

**Рис. 8.2. Схема системы с поэлементным резервированием**

Вероятность безотказной работы системы с поэлементным резервированием определяем по формуле (2.6):

$$P_{ct} \approx P_{1\bar{1}2\bar{2}} \vee P_{1\bar{1}22\bar{2}} \vee P_{13\bar{2}3\bar{2}},$$

где  $P_{1\bar{1}2\bar{2}}(t)$  – вероятность безотказной работы группы из первого основного и резервного элементов;

$P_{1\bar{1}22\bar{2}}(t)$  – вероятность безотказной работы группы из второго основного и резервного элементов;

$P_{13\bar{2}3\bar{2}}(t)$  – вероятность безотказной работы группы из третьего основного и резервного элементов.

$$P_{1\bar{1}2\bar{2}} \approx 1 - 1 - P_{11} \vee 1 - P_{21} \approx 1 - (1 - 0,9) \vee 1 - 0,9 \approx 1 - 0,01 \approx 0,99$$

$$P_{1\bar{1}22\bar{2}} \approx 1 - 1 - P_{12}$$

. t

$$\begin{aligned}
& \cdot \nabla \tilde{1} P_{22} \\
& \cdot \begin{matrix} t \\ \cdot \circ \tilde{1} (\tilde{1} 0,9) \nabla \tilde{1} 0,9 \circ \tilde{1} 0,01 \circ 0,99 \end{matrix} \\
& P_{1323} t \circ \tilde{1} \tilde{1} \\
& P_{13} t \\
& \cdot \nabla \tilde{1} \\
& P_{23} t \\
& \cdot \circ \tilde{1} (\tilde{1} 0,9) \nabla \tilde{1} 0,9 \circ \tilde{1} 0,01 \circ 0,99
\end{aligned}$$

Вероятность безотказной работы системы с поэлементным резервированием:

$$P_{ct} \approx P_{11} P_{21} P_{12} P_{22} P_{13} P_{23} \approx 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \approx 0,97,$$

Так как вероятности безотказной работы групп элементов близки к единице, можно было воспользоваться формулой для приближенного расчета (2.3):

$$P_{ct} \approx 1 - \sum_{i=1}^n P_{i,t} \approx 1 - \sum_{i=1}^3 0,99 \approx 1 - 0,03 \approx 0,97.$$

Вероятность отказа основной системы определяем по формуле (2.5)

$$Q_{ct} \approx 1 - P_{ct} \approx 1 - 0,97 \approx 0,03.$$

**Ответ:** для системы без резервирования:  $P_{ct} \approx 0,729$ ,  $Q_{ct} \approx 0,271$ ; для системы с общим резервированием  $P_{ct} \approx 0,927$ ,  $Q_{ct} \approx 0,073$ ; для системы с поэлементным резервированием:  $P_{ct} \approx 0,97$ ,  $Q_{ct} \approx 0,03$ . Таким образом, максимальная надежность достигается при поэлементном резервировании.

### Задания для самостоятельной работы студентов

**Задача 8.1.** 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.

**Задача 8.2.** Определить количество равнонадежных резервных элементов с вероятностью безотказной работы  $P_i(t)=0,9$ , необходимых для того, чтобы обеспечить вероятность безотказной работы системы равную  $P_c(t)=0,99$ .

**Задача 8.3.** 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.

**Задача 8.4.** 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.

**Задача 8.5.** Определить количество резервных элементов с вероятностью отказа равной 0,05, для того, чтобы вероятность безотказной работы системы была равна  $P_c(t)=0,999$ .

**Задача 8.6.** 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.

**Задача 8.7.** 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.

**Задача 8.8.** 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.

## **Практическое занятие № 9.**

### **ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ**

**Цель:** получить навыки планирования испытаний на надежность.

#### **Задачи обучения:**

- ознакомить с видами испытаний на надежность;
- привить навыки разработки плана проведения испытаний на надежность;
- научить обрабатывать результаты испытаний.

#### **Задания и методические указания к их выполнению**

Работа студента заключается в изучении методик решения задач, самостоятельном решении заданий и ответах на поставленные контрольные вопросы.

**Пример 9.1.** Определить число изделий, которое необходимо поставить на испытания или получить число отказов в процессе испытаний, чтобы подтвердить оценки параметров, соответствующие требованиям технического задания. Исходные данные для планирования испытаний:  $\alpha=0,2$ ;  $\beta=0,1$ ;  $T_0=200$  ч;  $T_0/T_1=1,9$ . Экспоненциальный закон распределения наработки для фиксированного объема.

**Решение.**

По значению  $T_0/T_1=1,9$  из таблицы для  $\chi^2$ -распределения и заданным значениям  $\alpha=0,2$ ;  $\beta=0,1$  находим  $\downarrow_{0,8}^{\circ} 16,31 \quad \downarrow_{0,1}^{\circ} 30,8$ ;

$2n=22$ . Следовательно, объем выборки равен  $n=11$ .

Если в результате испытаний до появления одиннадцатого отказа полученное опытное значение наработки до отказа  $t$  удовлетворяет условию

$$T \downarrow_{0,8}^{\circ} 22 \quad 200 \nabla 16,31$$

$$t \circ \frac{0 \quad 0,1}{22}^{\circ} \frac{\quad}{22}^{\circ} 148 \text{ ч},$$

то надежность проверяемой партии изделий соответствует требованиям ТЗ. Отсюда суммарное время испытаний должно быть равно:

$$S_n \circ tn \circ 148 \nabla 11 \circ 1628 \text{ ч}.$$

**Пример 9.2.** Определить число насосных агрегатов по гидроразрыву пласта и суммарный объем испытаний, принимая во внимание, что отказы во время испытаний за время  $t$  не допускаются. Исходные данные для планирования испытаний:  $\alpha=0,1$ ;  $t=3$  ч;  $T_0=600$  ч. Экспоненциальный закон распределения наработки для фиксированного объема.

**Решение.**

Вычисляем объем выборки (число агрегатов)

$$n \circ \frac{T_0 |\ln \tilde{1} \rightarrow|}{t} \frac{600}{3} |\ln 0,9| \circ 21.$$

Следовательно, объем выборки  $n=21$ . Отсюда суммарное время испытаний без отказов должно быть

$$S_n \circ tn \circ 21 \nabla 3 \circ 63 \text{ ч}$$

Полученное суммарное время работы без отказов может быть отработано одним или несколькими агрегатами.

**Пример 9.3.** Определить в процессе испытаний число отказов насосных агрегатов по гидроразрыву пласта и суммарный



объем испытаний для получения оценок параметров, соответ-

ствующих требованиям технического задания. Исходные данные для планирования испытаний:  $\alpha=\beta=0,1$ ;  $T_1=600$  ч;  $T_0=800$  ч. Экспоненциальный закон распределения наработки для фиксированного объема.

### Решение.

По значению  $T_0/T_1=1,33$  из таблицы для  $\chi^2$ -распределения и заданным значениям  $\alpha=0,1$ ;  $\beta=0,1$  находим  $\chi^2_{0,1} \approx 172,42$ ;

$\chi^2_{0,9} \approx 128,16$ ;  $2n=150$ . Следовательно, объем выборки (число отказов) равен  $n=75$ .

Определяем опытное значение наработки на отказ:

$$t \approx \frac{T \chi^2_{0,9}}{2n} = \frac{600 \cdot 128,16}{150} \approx 689,68 \text{ ч}.$$

Отсюда суммарное время испытаний для подтверждения минимальной наработки до отказа  $T_1=600$  ч при числе отказов  $n=75$  должно быть равно

$$S_n \approx tn \approx 75 \cdot 689,68 \approx 51725 \text{ ч}.$$

### Контрольные вопросы

1. Какие существуют виды испытаний на надежность?
2. Приведите цель определительных испытаний.
3. Какие особенности имеют контрольные испытания?
4. Какие принципы используются при проектировании ускоренных испытаний?
5. Дайте характеристику проведения сокращенных и форсированных испытаний.
6. В каких случаях применяются специальные виды испытаний на надежность?
7. В чем особенность проведения испытаний на надежность при отказах вследствие износа?

## **Библиографический список**

1. Острейковский В.А. Теория надежности: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.
2. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
3. Колобов А.Б. Надёжность технических систем: Курс лекций. Электронный ресурс - Ивановский государственный энергетический университет - <http://elib.ispu.ru/library/lessons/Kolobov/>.
4. Яхьяев Н.Я., Кораблин А.В. Основы теории надежности и диагностики / Яхьяев Н.Я., Кораблин А.В – М.: Издательский центр Академия (Academia), 2009. - 256 с.

Учебно-методическое издание

**Шемшура Елена Анатольевна**

**Учебно-методическое пособие  
к практическим занятиям по дисциплине  
«Надежность технических систем»**

---

Отв. за выпуск И.И. Кузнецова

Подписано в печать 18.05.2017.

Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл.-печ.л. 3,26. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 50 экз.

---

Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова

Адрес ун-та: 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Отпечатано в Шахтинском институте(филиале)  
ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова