МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет «Автоматизация, мехатроники и управления»
Кафедра «Автоматизация производственных процессов»

Задание к контрольной работе по дисциплине

Надежность автоматизированных систем

Ростов-на-Дону
2022

УДК 62-192

Составитель: ст. преподаватель Носачев С.В.

Математические основы теории надежности. Конспект лекций. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2022. – 70 с.

Конспект лекций для выполнения контрольной работы по дисциплине «Средства автоматизации и управления» предназначены для студентов заочной формы обучения по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производство» профиль «Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении»

УДК 62-192

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донской государственный технический университет

Методические указания к контрольной

Исходные данные и структура пояснительной записки

Исходные данные для выполнения контрольной работы записаны в таблицу. Каждый студент использует свою строку таблицы, номер которой соответствуют последним двум цифрам зачетной книжки.

№ №	Раздел						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
01	1	1	1	1	1	1	1
02	2	2	2	2	2	2	2
03	3	3	3	3	3	3	3
04	4	4	4	4	4	4	4
05	5	5	5	5	5	5	5
06	6	6	6	6	6	6	6
07	7	7	7	7	7	7	1
08	8	8	8	8	8	8	2
09	9	9	9	9	9	9	3
10	10	10	10	10	10	10	4
11	11	11	11	11	1	11	5
12	12	12	12	12	2	12	6
13	13	13	13	13	3	13	1
14	14	14	1	14	4	1	2
15	15	15	2	1	5	2	3
16	16	1	3	2	6	3	4
17	1	2	4	3	7	4	5
18	2	3	5	4	8	5	6
19	3	4	6	5	9	6	1
20	4	5	7	6	10	7	2
21	5	6	8	7	1	8	3
22	6	7	9	8	2	9	4
23	7	8	10	9	3	10	5
24	8	9	11	10	4	11	6
25	9	10	12	11	5	12	1
26	10	11	13	12	6	13	2
27	11	12	1	13	7	1	3
28	12	13	2	14	8	2	4
29	13	14	3	1	9	3	5
30	14	15	4	2	10	4	6
31	15	1	5	3	1	5	1
32	16	2	6	4	2	6	2
33	1	3	7	5	3	7	3
34	2	4	8	6	4	8	4
35	3	5	9	7	5	9	5
36	4	6	10	8	6	10	6
37	5	7	11	9	7	11	1
38	6	8	12	10	8	12	2
39	7	9	13	11	9	13	3
40	8	10	1	12	10	1	4
41	9	11	2	13	1	2	5
42	10	12	3	14	2	3	6
43	11	13	4	1	3	4	1
44	12	14	5	2	4	5	2
45	13	15	6	3	5	6	3
46	14	1	7	4	6	7	4
47	15	2	8	5	7	8	5

48	16	3	9	6	8	9	6
49	1	4	10	7	9	10	1
50	2	5	11	8	10	11	2
51	3	6	12	9	1	12	3
52	4	7	13	10	2	13	4
53	5	8	1	11	3	1	5
54	6	9	2	12	4	2	6
55	7	10	3	13	5	3	1
56	8	11	4	14	6	4	2
57	9	12	5	1	7	5	3
58	10	13	6	2	8	6	4
59	11	14	7	3	9	7	5
60	12	15	8	4	10	8	6
61	13	1	9	5	1	9	1
62	14	2	10	6	2	10	2
63	15	3	11	7	3	11	3
64	16	4	12	8	4	12	4
65	1	5	13	9	5	13	5
66	2	6	1	10	6	1	6
67	3	7	2	11	7	2	1
68	4	8	3	12	8	3	2
69	5	9	4	13	9	4	3
70	6	10	5	14	10	5	4
71	7	11	6	1	1	6	5
72	8	12	7	2	2	7	6
73	9	13	8	3	3	8	1
74	10	14	9	4	4	9	2
75	11	15	10	5	5	10	3
76	12	1	11	6	6	11	4
77	13	2	12	7	7	12	5
78	14	3	13	8	8	13	6
79	15	4	1	9	9	1	1
80	16	5	2	10	10	2	2
81	1	6	3	11	1	3	3
82	2	7	4	12	2	4	4
83	3	8	5	13	3	5	5
84	4	9	6	14	4	6	6
85	5	10	7	1	5	7	1
86	6	11	8	2	6	8	2
87	7	12	9	3	7	9	3
88	8	13	10	4	8	10	4
89	9	14	11	5	9	11	5
90	10	15	12	6	10	12	6
91	11	1	13	7	1	13	1
92	12	2	1	8	2	1	2
93	13	3	2	9	3	2	3
94	14	4	3	10	4	3	4
95	15	5	4	11	5	4	5
96	16	6	5	12	6	5	6
97	1	7	6	13	7	6	1
98	2	8	7	14	8	7	2
99	3	9	8	1	9	8	3
00	4	10	9	2	10	9	4

Структура пояснительной записки

Основные обозначения и сокращения.

Раздел 1. Определение количественных характеристик надежности по статистическим данным об отказах изделия.

Раздел 2. Аналитическое определение количественных характеристик надежности изделия.

Раздел 3. Последовательное соединение элементов в систему.

Раздел 4. Расчет надежности системы с постоянным резервированием.

Раздел 5. Резервирование замещением в режиме облегченного (теплого) резерва и в режиме ненагруженного (холодного) резерва.

Раздел 6. Расчет надежности системы с поэлементным резервированием.

Раздел 7. Резервирование с дробной кратностью и постоянно включенным резервом.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$P(t)$ – вероятность безотказной работы системы в течение времени t;

$p(t)$ – вероятность безотказной работы элемента в течение времени t;

$Q(t)$ – вероятность отказа системы в течение времени t;

$q(t)$ – вероятность отказа элемента в течение времени t;

H – число однотипных элементов;

$N_{\circ}$ – первоначальное число объектов;

$R(t)$ – число отказавших систем за время t;

$P_c(t)$ – вероятность бессбойной работы системы в течение времени t;

$Q_c(t)$ – вероятность сбоев в работе системы в течение времени t;

$R_c(t)$ – число систем, у которых произошел сбой за время t;

$S(t)$ – вероятность восстановления в течение времени t;

$N_{ов}$ – число изделий, поставленных не восстановление;

$N_{в}$ – число изделий, время восстановления которых было меньше заданного времен t;

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов за период времени t;

$N_{ср}(t)$ – среднее число объектов, исправно работающих в интервале Δt;

$\lambda_{раб}$ – интенсивность отказов при рабочем режиме;

$\lambda_{ном}$ – интенсивность отказов при номинальном режиме;

a(t) – частота отказов в течение времени t;

ω(t) – средняя частота отказов в течение времени t;

∧(t) – суммарная частота отказов в течение времени t;

$a_{в}(t)$ – частота восстановления в течение времени t;

$\lambda_{ср}(t)$ – средняя интенсивность отказов в течение времени t;

$T_{ср}$, m_t – среднее время безотказной работы;

$t_{ср}$ – средняя наработка на отказ;

N – число узлов и деталей;

γ – процентная наработка;

$T_{\chi,с}$ – средний срок сохраняемости;

$\lambda_с$ – интенсивность отказов при хранении;

P_0 – значение вероятности безотказной работы элементов в момент поступления на производство;

$P_и$ – значение вероятности безотказной работы элементов к моменту их использования;

μ – интенсивность ремонта системы;

T_k – среднее время контроля;

$T_П$ – среднее время поиска дефекта;

$T_у$ – среднее время устранения дефекта;

$K_Г$ – коэффициент готовности;

$t_р$ – время безотказной работы системы;

$t_в$ – время восстановления системы, т.е. время, затраченное на профилактику и ремонт системы;

$M_{ср.и}$ – среднее число исправных комплектов;

M – общее число комплектов системы;

$K_{о.г}$ – коэффициент оперативной готовности;

$K_П$ – коэффициент вынужденного простоя;

$K_р$ – коэффициент профилактики;

W – эффективность профилактики;

$N_{нпф}$ – число отказов непрофилактируемой системы;

$N_{пф}$ – число отказов профилактируемой системы;

$T_{пф}$ – наработка на отказ профилактируемой системы;

$T_{нпф}$ – наработка на отказ непрофилактируемой системы;

$T_{в}$ – среднее время восстановления;

$K_{н.о}$ – относительный коэффициент отказов;

$K_{с.э}$ – коэффициент стоимости эксплуатации;

$C_{с.э}$ – стоимость эксплуатации системы в течение одного года;

$C_{С.И}$ – стоимость изготовления системы;

$C_{з}$ – затраты на запасные детали;

$C_{Р}$ – затраты на ремонт;

$C_{ПР}$ – затраты на профилактику;

$C_{Р.П}$ – затраты на содержание ремонтного персонала;

$C_{Э.Р}$ – затраты на другие эксплуатационные расходы;

СУ – системы управления;

КПН – количественные показатели надежности;

$\alpha_{общ.}(t)$ – частота отказов систем при общем резервировании;

$\lambda_0(t)$ – интенсивность отказов любой m+1 систем;

$\lambda_{общ.}(t)$ – интенсивность отказов систем при общем резервировании;

$\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов i – ой системы;

$P_{общ.}(t)$ – вероятность безотказной работы системы с общим резервированием;

$Q_{общ.}(t)$ – вероятность отказов системы с общим резервированием;

$\alpha_{раз.}(t)$ – частота отказов при раздельном резервировании;

$\lambda_{раз.}(t)$ – интенсивность отказов при раздельном резервировании;

$P_{раз.}(t)$ – вероятность безотказной работы системы с раздельным резервированием;

$Q_{раз.}(t)$ – вероятность отказов системы с раздельным резервированием;

$G_{р.}(t)$ – выигрыш резервированной относительно нерезервированной системы по вероятности безотказной работы;

$G_Q(t)$ – выигрыш резервированной относительно нерезервированной системы по вероятности отказов;

$G_\lambda(t)$ – резервированной относительно нерезервированной системы по интенсивности отказов;

$G_\alpha(t)$ – резервированной относительно нерезервированной системы по частоте отказов;

$G_T(t)$ – резервированной относительно нерезервированной системы по среднему времени безотказной работы;

$G^П{}_Q(t)$ – выигрыш надежности системы при раздельном резервировании по сравнению с общим резервировании с постоянным включенным резервом по вероятности отказов;

$G^П{}_P(t)$ – надежности системы при раздельном резервировании по сравнению с общим резервировании с постоянным включенным резервом по вероятности безотказной работы;

$G^П{}_\lambda(t)$ – надежности системы при раздельном резервировании по сравнению с общим резервировании с постоянным включенным резервом по интенсивности отказов;

$G^П{}_\alpha(t)$ – надежности системы при раздельном резервировании по сравнению с общим резервировании с постоянным включенным резервом по частоте отказов;

C_n^k – число сочетаний из n возможных событий по k событий;

РБС – работоспособное состояние;

НРС – неработоспособное состояние;

σ – среднеквадратическое отклонение;

σ_p – среднеквадратическое отклонение в масштабе Релея.

Раздел 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ОБ ОТКАЗАХ ИЗДЕЛИЯ.

Теоретические сведения

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$\widehat{P}(t) = \frac{N - n(t)}{N} \tag{1.1}$$

где: *N* - число изделий, поставленных на испытания;

n(t) - число изделий, отказавших к моменту времени *t*;

$\widehat{P}(t)$ - статистическая оценка вероятности безотказной работы изделия.

Для вероятности отказа по статистическим данным справедливо соотношение

$$\widehat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N} \tag{1.2}$$

где: *n(t)* - число изделий, отказавших к моменту времени t;

$\widehat{Q}(t)$ - статистическая оценка вероятности отказа изделия.

т.к вероятность безотказной работы и вероятность отказа изделия – события несовместные, то

$$\widehat{Q}(t) + \widehat{P}(t) = 1$$

Частота отказов по статистическим данным об отказах определяется выражением:

$$\widehat{f}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t} \tag{1.3}$$

где: *n(Δt)* - число отказавших изделий на участке времени *Δt*;

$\widehat{f}(t)$ - статистическая оценка частоты отказов изделия;

Δt - интервал времени.

Интенсивность отказов по статистическим данным об отказах определяется формулой

$\widehat{\lambda}(t)=\dfrac{n(\Delta t)}{N_{cp}\cdot\Delta t}$	(1.4)

где: N_{cp} - число изделий, исправно работающих к концу участка времени Δt;

$n(\Delta t)$ - число отказавших изделий на участке времени Δt;

$\widehat{\lambda}(t)$ - статистическая оценка интенсивности отказов изделия.

Среднее время безотказной работы изделия по статистическим данным оценивается выражением:

$\widehat{T}_{cp}=\widehat{m}_t=\dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^{N}t_i$	(1.5)

где: t_i - время безотказной работы i- го изделия;

N - общее число изделий, поставленных на испытания;

$\widehat{m}_t$ - статистическая оценка среднего времени безотказной работы изделия.

Для определения $\widehat{m}_t$ по формуле (1.5) необходимо знать моменты выхода из строя всех N изделий. Можно определять $\widehat{m}_t$ из уравнения

$m_t^{*}\approx\dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^{m}n_i t_{cp.i}$	(1.6)
$t_{cp.i}=(t_{i-1}+t_i)/2$;	
$m=t_k/\Delta t$;	
$\Delta t=t_{i+1}-t_i$;	

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

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;

Δt - интервал времени.

Дисперсия времени безотказной работы изделия по статистическим данным определяется формулой:

$$\widehat{D}_t = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(t_i - \widehat{m}_t)^2$$	(1.7)

где: $\widehat{D}_t$ - статистическая оценка дисперсии времени безотказной работы изделия.

Задачи

Задача 1.1. На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп, за 3000 час. отказало 80 ламп. Требуется определить P*(t), Q*(t) при t = 3000 час.

Задача 1.2. 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. Требуется определить статистическую оценку частоты и интенсивности отказов электронных ламп в промежутке времени 3000 - 4000 час.

Задача 1.3. На испытание поставлено N = 400 изделий. За время t = 3000 час отказало 200 изделий. За интервал времени (t, t+Δt), где Δt = 100 час, отказало 100 изделий. Требуется определить $\widehat{P}$ (3000), $\widehat{P}$ (3100), $\widehat{f}$ (3000), $\widehat{\lambda}$ (3000).

Задача 1.4. На испытание поставлено 6 однотипных изделий. Получены следующие значения t_i (t_i - время безотказной работы i- 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. Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Задача 1.5. За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зафиксировано 7 отказов. Время восстановления составило: t_1 =12мин.; t_2=23мин.; t_3 =15мин.; t_4=9мин.; t_5=17мин.; t_6=28мин.; t_7=25мин.; t_8=31мин. Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры $\widehat{m}_{t\ вост}$.

Задача 1.6. В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в табл.1.1. Требуется определить $\widehat{m}_t$.

Таблица 1.1

Δt_i,час.	n_i	Δt_i,час.	n_i	Δt_i,час.	n_i
0-5	1	30-35	4	60-65	3
5-10	5	35-40	3	65-70	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	–	–

Задача 1.7. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 час. отказало 50 изделий. За интервал времени 4000 - 4100 час. отказало ещё 20 изделий. Требуется определить $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ при t=4000 час.

Задача 1.8. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 час. отказало 50 изделий. Требуется определить $\hat{P}(t)$ и $\hat{Q}(t)$ при t=4000 час.

Задача 1.9. В течение 1000 час из 10 гироскопов отказало 2. За интервал времени 1000 - 1100 час. отказал еще один гироскоп. Требуется определить $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ при t =1000 час.

Задача 1.10. На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За первые 3000 час. отказало 80 ламп. За интервал времени 3000 - 4000 час. отказало еще 50 ламп. Требуется определить $\hat{P}(t)$ и $\hat{Q}(t)$ при t=4000 час.

Задача 1.11. 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. Необходимо вычислить $\hat{P}(t)$ при t=1300час. и t=1400 час.; $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ при t =1300 час.

Задача 1.12. 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. Необходимо вычислить $\hat{P}(t)$ при t=60час. и t=65 час.; $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ при t =60 час.

Задача 1.13. В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования, которые прошли предварительную 80-часовую приработку, получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в табл.1.2. Необходимо определить $\hat{m}_t$.

Таблица 1.2.

Δt_i,час.	n_i	Δt_i,час.	n_i	Δt_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	–	–

Задача 1.14. На испытание поставлено 8 однотипных изделий. Получены следующие значения t_i (t_i - время безотказной работы i-го изделия): t_1=560час.; t_2=700час.; t_3=800час.; t_4=650час.; t_5=580час.; t_6=760час.; t_7=920час.; t_8=850час. Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Задача1.15. За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зарегистрировано 6 отказов. Время восстановления составило: t_1=15мин.; t_2=20мин.; t_3=10мин.; t_4=28мин.; t_5=22мин.; t_6=30мин. Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры $\widehat{m}_{t\ вост}$.

Задача1.16. На испытание поставлено 1000 изделий. За время t=11000 час. вышло из строя 410 изделий. Зв последующий интервал времени 11000-12000 час. вышло из строя еще 40 изделий. Необходимо вычислить $\widehat{P}(t)$ при t=11000 час. и t=12000 час., а также $\widehat{f}(t)$, $\widehat{\lambda}(t)$ при t=11000 час.

Раздел № 2

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЯ.

Теоретические сведения

Выпишем формулы, по которым определяются количественные характеристики надежности изделия

$P(t) = e^{(-\int_0^t \lambda(t)dt)} = 1 - \int_0^t f(t)dt;$	(2.1)
$Q(t) = 1 - P(t);$	(2.2)
$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt};$	(2.3)
$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)};$	(2.4)
$m_t = \int_0^\infty P(t)dt,$	(2.5)

где: *P(t)* – вероятность безотказной работы изделия на интервале времени от 0 до t;

Q(t) – вероятность отказа изделия на интервале времени от 0 до t;

f(t) – частота отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы изделия t;

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов изделия;

m_t – среднее время безотказной работы изделия.

Формулы (2.1) – (2.5) для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид

$P(t) = e^{-\lambda t}$	(2.6)
$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	(2.7)
$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$	(2.8)

$\lambda\left(t\right)=\dfrac{\lambda\cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}}=\lambda$	(2.9)
$m_t=\dfrac{1}{\lambda}$	(2.10)

Формулы (2.1) - (2.5) для нормального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид

$P(t)=0,5-\Phi(U);$	(2.11)
$U=\dfrac{t-m_t}{\sigma_t}$	
$Q(t)=0,5+\Phi(U);\ \ \Phi(U)=\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_0^U e^{-\frac{U^2}{2}}dU$	(2.12)
$f(t)=\dfrac{\varphi(U)}{\sigma_t};\ \varphi(U)=\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}}\cdot e^{-\frac{U^2}{2}}$	(2.13)
$\lambda(t)=\dfrac{\varphi(U)}{\sigma(t)}\cdot\dfrac{1}{0.5-\Phi(U)}$	(2.14)

где: *Ф(U)* - функция Лапласа, обладающая свойствами

$\Phi(0)=0$;	(2.15)
$\Phi(-U)=-\Phi(U)$;	(2.16)
$\Phi(\infty)=0.5$.	(2.17)

Значения функции Лапласа приведены в *приложении А*.

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

Здесь m_t - среднее значение случайной величины T;

σ_t^2 - дисперсия случайной величины T;

t - время безотказной работы изделия.

Формулы (2.1) - (2.5) для закона распределения Вейбулла времени безотказной работы изделия имеют вид

$P(t)=e^{-at^k}$	(2.18)

$Q(t) = 1 - e^{-at^k}$	(2.19)
$f(t) = akt^{k-1} \cdot P(t)$	(2.20)
$\lambda(t) = akt^{k-1}$	(2.21)
$m(t) = \dfrac{\frac{1}{k}\Gamma\left(\frac{1}{k}\right)}{a^{\frac{1}{k}}}$	(2.22)

где: *a, k* - параметры закона распределения Вейбулла.

Г(x) - гамма-функция, значения которой приведены в *приложении В*.

Формулы (2.1) - (2.5) для закона распределения Релея времени безотказной работы изделия имеют вид

$P(t) = \mathrm{e}^{\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right)}$	(2.23)
$Q(t) = 1 - \mathrm{e}^{\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right)}$	(2.24)
$f(t) = \dfrac{t}{\sigma_t^2} \cdot \mathrm{e}^{\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right)}$	(2.25)
$\lambda(t) = \dfrac{t}{\sigma_t^2}$	(2.26)
$m(t) = \sigma_t \sqrt{\dfrac{\pi}{2}}$	(2.27)

где: σ_t - мода распределения случайной величины *t*;

t - время безотказной работы изделия.

Задачи

Задача 2.1. Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 2.5 \bullet 10^{-5}$ 1/час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности элемента $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$, m_t для t=1000час.

Задача 2. 2. Время работы элемента до отказа подчинено нормальному закону с параметрами m_t =8000 час, σ_t =2000 час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности P(t), f(t), λ(t), m_t для t=10000 час.

Задача 2.3. Время работы изделия до отказа подчиняется закону распределения Релея. Требуется вычислить количественные характеристики надежности изделия P(t),f(t),λ(t),m_t для t=1000час, если параметр распределения σ_t=1000 час.

Задача 2.4. Время безотказной работы изделия подчиняется закону Вейбулла с параметрами k=1.5; a=10^{-4}1/час, а время работы изделия t=100 час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности изделия P(t),f(t),λ(t),m_t.

Задача 2.5. В результате анализа данных об отказах аппаратуры частота отказов получена в виде

$$f(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$$

Требуется определить количественные характеристики надежности: P(t), λ(t), m_t.

Задача 2.6. Вероятность безотказной работы автоматической линии изготовления цилиндров автомобильного двигателя в течении 120 час равна 0.9. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется рассчитать интенсивность отказов и частоту отказов линии для момента времени t =120 час., а также среднее время безотказной работы.

Задача 2.7. Среднее время безотказной работы автоматической системы управления равно 640 час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение 120 час, частоту отказов для момента времени t=120 час и интенсивность отказов.

Задача 2.8. Время работы изделия подчинено нормальному закону с параметрами m_t = 8000 час, σ_t =1000 час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности P(t), f(t), λ(t), m_t для t=8000 час.

Задача 2.9.Время безотказной работы прибора подчинено закону Релея с параметром σ_t= 1860 час. Требуется вычислить P(t), f(t),λ(t) для t = 1000 час и среднее время безотказной работы прибора.

Задача 2.10. Время исправной работы скоростных шарикоподшипников подчинено закону Вейбулла с параметрами к=2,6; a= 1,65*10^{-7} 1/час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности P(t), f(t), λ(t) для t=150 час. и среднее время безотказной работы шарикоподшипников.

Задача 2.11. Вероятность безотказной работы изделия в течение t=1000 час. P(1000)=0,95. Время исправной работы подчинено закону Релея. Требуется определить количественные характеристики надежности f(t), λ(t), m_t.

Задача 2.12. Среднее время исправной работы изделия равно 1260 час. Время исправной работы подчинено закону Релея. Необходимо найти его количественные характеристики надежности P(t), f(t), λ(t) для t=1000 час.

Задача 2.13. В результате анализа данных об отказах изделия установлено, что частота отказов имеет вид $f(t)=2\lambda e^{-\lambda t}(1-e^{-\lambda t})$. Необходимо найти количественные характеристики надежности P(t), λ(t), m_t.

Задача 2.14. В результате анализа данных об отказах изделий установлено, что вероятность безотказной работы выражается формулой $P(t)=3e^{-\lambda t}-3e^{-2\lambda t}+e^{-3\lambda t}$. Требуется найти количественные характеристики надежности P(t), λ(t), m_t.

Задача 2.15. 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 час. и среднее квадратическое отклонение σ_t= 100 час.

Раздел №3.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМУ

Теоретические сведения

Соединение элементов называется последовательным, если отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Система последовательно соединенных элементов работоспособна тогда, когда работоспособны все ее элементы.

Вероятность безотказной работы системы за время t определяется формулой

$\mathrm{P_c}(\mathrm{t}) = \mathrm{P_1}(\mathrm{t}) \cdot \mathrm{P_2}(\mathrm{t}) \cdot \ldots \cdot \mathrm{P_n}(\mathrm{t}) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t),$	(3.1)

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

Если P_i (t) =P(t) то,

$P_c(t)=P^n(t).$	(3.2)

Выразим $P_c(t)$ через интенсивность отказов $\lambda_i(t)$элементов системы.

Имеем:

$P_c(t) = \mathrm{e}^{(-\sum_{i=1}^{n}\int_0^t \lambda_i(t)dt)}$	(3. 3)

или

$P_c(t) = \mathrm{e}^{(-\int_0^t \lambda_c(t)dt)},$	(3.4)

где:

$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t).$	(3.5)

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

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

Вероятность отказа системы на интервале времени (0, t) равна

$Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} P_i(t).$	(3.6)

Частота отказов системы $f_c(t)$ определяется соотношением

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt}. \tag{3.7}$$

Интенсивность отказов системы

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)}. \tag{3.8}$$

Среднее время безотказной работы системы:

$$m_{tc} = \int_0^\infty P_c(t)dt. \tag{3.9}$$

В случае экспоненциального закона надежности всех элементов системы имеем

$$\lambda_i(t) = \lambda_i = const \tag{3.10}$$

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = \lambda_c \tag{3.11}$$

$$P_i(t) = \mathrm{e}^{(-\lambda t)} \tag{3.12}$$

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t} \tag{3.13}$$

$$f_c(t) = \lambda_c \cdot e^{-\lambda_c t} \tag{3.14}$$

$$Q_c(t) = 1 - e^{-\lambda_c t} \tag{3.15}$$

$$m_{tc} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i} \tag{3.16}$$

$$m_{ti} = \frac{1}{\lambda_i}; \tag{3.17}$$

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

При расчете надежности систем часто приходится перемножать вероятности безотказной работы отдельных элементов расчета, возводить их в степень и извлекать корни. При значениях P(t), близких к единице, эти вычисления можно с достаточной для практики точностью выполнять по следующим приближенным формулам:

$$\left.\begin{array}{c} P_1(t)P_2(t)...P_n(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^{n} q_i(t), \\ P_i^n(t) = 1 - Nq_i(t), \\ \sqrt[n]{P_i(t)} = 1 - q_i(t)/n, \end{array}\right\} \qquad (3.18)$$

где: q_i (t) - вероятность отказа i - го элемента.

Задачи

Задача 3.1. Система состоит из трех устройств. Интенсивность отказов электронного устройства равна λ_1=0,16*10^{-3} 1/час = const. Интенсивности отказов двух электромеханических устройств линейно зависят от времени и определяются следующими формулами $l_2 = 0,23 \cdot 10^{-4} t 1/\textit{час}, l_3 = 0,06 \cdot 10^{-6} t^{2,6} 1/\textit{час}.$ Необходимо рассчитать вероятность безотказной работы изделия в течение 100 час.

Задача 3.2. Система состоит из трех блоков, среднее время безотказной работы которых равно: m_{t1}=160 час; m_{t2} =320 час; m_{t3} = 600 час. Для блоков справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется определить среднее время безотказной работы системы.

Задача 3.3. Система состоит из 12600 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{ср}$=0,32•10^{-6} 1/час. Требуется определить P_c(t), q_c(t), f_c(t), m_{tc}, для t=50 час. Здесь P_c(t) - вероятность безотказной работы системы в течение времени t; Q_c(t) – вероятность отказа системы в течение времени t; f_c(t) – частота отказов или плотность вероятности времени T безотказной работы системы; m_{tc} – среднее время безотказной работы системы.

Задача 3.4. 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. Необходимо найти среднее время безотказной работы системы.

Задача 3.5. Вероятность безотказной работы одного элемента в течение времени tравна P(t) = 0,9997. Требуется определить вероятность безотказной работы системы, состоящей из n = 100 таких же элементов.

Задача.3.6.Вероятность безотказной работы системы в течение времени t равна $P_c(t) = 0,95.$ Система состоит из n= 120 равнонадежных элементов. Необходимо найти вероятность безотказной работы элемента.

Задача 3.7. Система состоит из 12600 элементов, средняя интенсивность отказов которых $l_{ср} = 0,32 \cdot 10^{-6} 1/\textit{час}.$ Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение t = 50 час.

Задача 3.8. Аппаратура связи состоит из 2000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{ср} = 0,33 \cdot 10^{-5} 1/час.$ Необходимо определить вероятность безотказной работы аппаратуры в течении t = 200 час и среднее время безотказной работы аппаратуры.

Задача 3.9. Невосстанавливаемая в процессе работы электронная машина состоит из 200000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda = 0,2 \cdot 10^{-6} 1/час$. Требуется определить вероятность безотказной работы электронной машины в течении t = 24 часа и среднее время безотказной работы электронной машины.

Задача 3.10. Система управления состоит из 6000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{ср.} = 0,16 \cdot 10^{-6} 1/час$. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течении t = 50 час и среднее время безотказной работы.

Задача 3.11. Прибор состоит из n = 5 узлов. Надежность узлов характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени t, которая равна: $P_1(t)=0,98$; $P_2(t)=0,99$; $P_3(t)=0,998$; $P_4(t)=0,975$; $P_5(t)=0,985$. Необходимо определить вероятность безотказной работы прибора.

Задача 3.12. 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. Требуется найти среднее время безотказной работы системы.

Задача 3.13. 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.

Раздел №4

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ.

Теоретические сведения

При постоянном резервировании резервные элементы 1, 2 соединены параллельно с основным (рабочим) элементом в течение всего периода работы системы. Все элементы соединены постоянно, перестройка схемы при отказах не происходит, отказавший элемент не отключается (рис.4.1.).

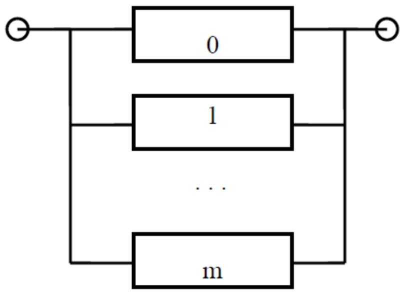

Рисунок 4.1

Вероятность отказа системы $Q_c(t)$ определяется формулой

$$Q_c(t)=\prod_{j=0}^{m} q_j(t), \qquad (4.1)$$

Где: $q_j(t)$ - вероятность отказа j - го элемента.

Вероятность безотказной работы системы

$$P_c(t)=1-\prod_{j=0}^{m}\left[1-P_j(t)\right], \qquad (4.2)$$

где: $P_j(t)$ - вероятность безотказной работы j - го элемента

Если $P_j(t)=P(t)$, j = 0, 1, …., m, то

$$\left.\begin{aligned} Q_c(t) &= q^{m+1}(t); \\ P_c(t) &= 1-\left[1-P(t)\right]^{m+1}. \end{aligned}\right\} \qquad (4.3)$$

При экспоненциальном законе надежности отдельных элементов имеем

$$\left.\begin{aligned} P_j(t) &= P(t) = e^{-\lambda t}; \\ Q_c(t) &= (1-e^{-\lambda t})^{m+1}; \\ P_c(t) &= 1-\left(1-e^{-\lambda t}\right)^{m+1}; \\ m_{tc} &= \frac{1}{\lambda}\sum_{i=0}^{m}\frac{1}{1+i}. \end{aligned}\right\} \qquad (4.4)$$

Резервирование называется общим, если резервируется вся система, состоящая из последовательного соединения n элементов. Схема общего резервирования показана на рис.4.2. Основная цепь содержит n элементов. Число резервных цепей равно m, т. е. кратность резервирования равна m.

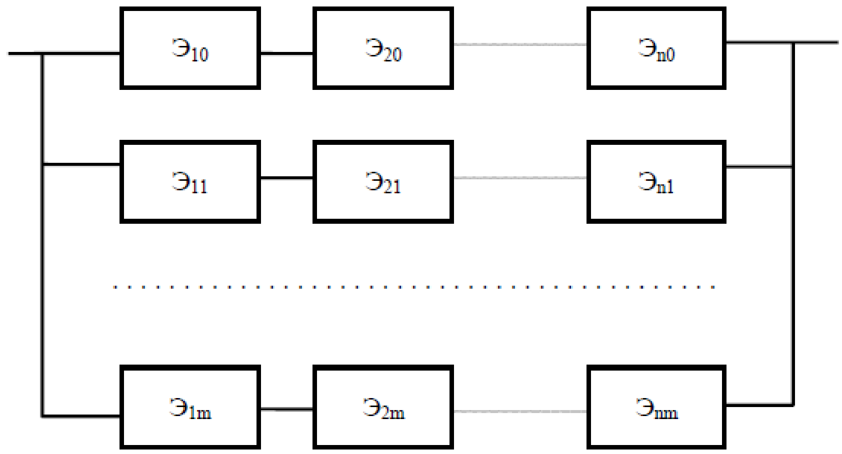

Рис.4.2

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

Запишем вероятность безотказной работы j - ой цепи

$$P_j(t) = \prod_{j=1}^{n} P_{ij}(t);\ j = 0,1,..,m, \qquad (4.5)$$

где: $P_{ij}(t)$, j=0,1,2,...m; i=1,2,3,...,n - вероятность безотказной работы элемента $Э_{ij}$.

Вероятность отказа j - ой цепи

$$Q_j(t) = 1-\prod_{i=1}^{n} P_{ij}(t) \qquad (4.6)$$

Вероятность отказа системы с общим резервированием

$$Q_c(t) = \prod_{j=0}^{m}\left[1-\prod_{i=1}^{n} P_{ij}(t).\right] \qquad (4.7)$$

Вероятность безотказной работы системы с общим резервированием

$P_c(t) = 1 - \prod_{j=0}^{m}\left[1 - \prod_{i=1}^{n} P_{ij}(t)\right]$	(4.8)

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

$P_{ij}(t) = P_i(t)$.	(4.9)

Тогда

$Q_c(t) = \left[1 - \prod_{i=1}^{n} P_i(t)\right]^{m+1}$;	(4.10)
$P_c(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^{n} P_i(t)\right]^{m+1}$.	(4.11)

Рассмотрим экспоненциальный закон надежности, т. е.

$\mathrm{P_i(t) = e^{-lit}}$	(4.12)

В этом случае формулы (4.10), (4.11) примут вид

$Q_c(\mathrm{t}) = (1 - \mathrm{e}^{-\mathrm{l0t}})^{\mathrm{m+1}}$,	(4.13)
$\mathrm{P_c(t) = 1 - (1 - e^{-l0t})^{m+1}}$,	(4.14)
$\lambda_0 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$,	(4.15)

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

Частота отказов системы с общим резервированием

$f_c(t) = -\dfrac{dp_c(t)}{dt} = \lambda_0 \cdot (m+1) e^{-\lambda_0 t} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_0 t}\right)^m$	(4.16)

Интенсивность отказов системы с общим резервированием

$\lambda_c(t) = \dfrac{f_c(t)}{p_c(t)} = \dfrac{\lambda_0 (m+1) e^{-\lambda_0 t} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_0 t}\right)^m}{1 - \left(1 - e^{-\lambda_0 t}\right)^{m+1}}$.	(4.17)

Среднее время безотказной работы резервированной системы

$$m_{tc} = T_0 \sum_{j=0}^{m} \frac{1}{1+j}$$	(4.18)

где: $T_0 = 1/\lambda_0$, - среднее время безотказной работы нерезервированной системы.

Задачи

Задача 4.1. 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. Необходимо 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.

Задача 4.2. 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.

Задача 4.3. Нерезервированная система управления состоит из n = 5000 элементов. Для повышения надежности системы предполагается провести общее дублирование элементов. Чтобы приближенно оценить возможность достижения заданной вероятности безотказной работы системы $P_c(t)$ = 0,9 при t =10 час., необходимо рассчитать среднюю интенсивность отказов одного элемента при предположении отсутствия последействия отказов.

Задача 4.4. 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. Требуется рассчитать вероятность безотказной работы приемника при t=100 час для следующих случаев: а) резерв отсутствует; б) имеется общее дублирование приемника в целом.

Задача 4.5. Для изображенной на рис.4.3. логической схемы системы определить $P_c(t)$, m_{tc}, $f_c(t)$, $\lambda_c(t)$. Здесь резерв нагруженный, отказы независимы.

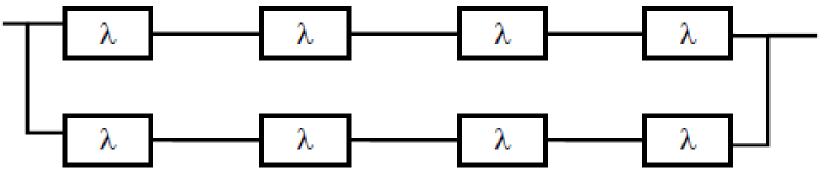

Рис.4.3

Задача 4.6. В радиопередатчике, состоящем из трех равнонадежных каскадов (n=3) применено общее постоянное дублирование всего радиопередатчика.

Интенсивность отказов каскада равна $\lambda=5*10^{-4}$ 1/час. Определить $P_c(t)$, m_{tc}, $f_c(t)$, $\lambda_c(t)$ радиопередатчика с дублированием.

Задача 4. 7. Для изображенной на рис.4.4. логической схемы системы определить интенсивность отказов $\lambda_c(t)$. Здесь резерв нагруженный, отказы независимы.

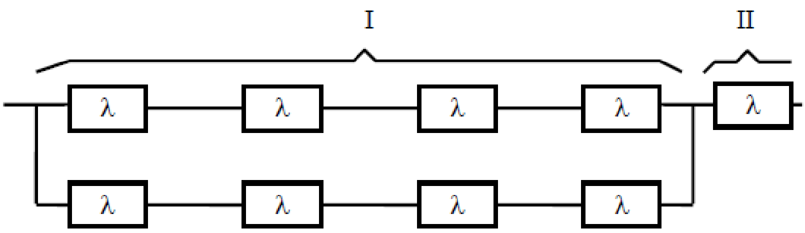

Рис.4.4

Задача 4.8. Радиоэлектронная аппаратура состоит из трех блоков I, II, III. Интенсивности отказов этих трех блоков соответственно равны: λ_1, λ_2, λ_3. Требуется определить вероятность безотказной работы аппаратуры $P_c(t)$ для следующих случаев: а) резерв отсутствует; б) имеется дублирование радиоэлектронной аппаратуры в целом.

Задача 4.9. Схема расчета надежности изделия показана на рис.4.5. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов изделия. Интенсивности отказов элементов имеют значения: λ_1= $0,3 \cdot 10^{-3}$ 1/час; λ_2= $0,7 \cdot 10^{-3}$ 1/час. Требуется найти вероятность безотказной работы изделия в течении времени t = 100 час, среднее время безотказной работы изделия, частоту отказов и интенсивность отказов в момент времени t=100 час.

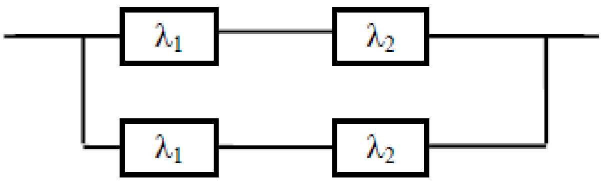

Рис.4.5

Задача 4.10. В телевизионном канале связи, состоящем из приемника и передатчика, применено общее дублирование. Передатчик и приемник имеют интенсивности отказов $\lambda_п=2 \cdot 10^{-3}$ 1/час, $\lambda_{пр}=1 \cdot 10^{-3}$ 1/час, соответственно. Схема канала представлена на рис.4.6. Требуется определить вероятность безотказной работы канала $P_c(t)$, среднее время безотказной работы m_{tc}, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $\lambda_c(t)$.

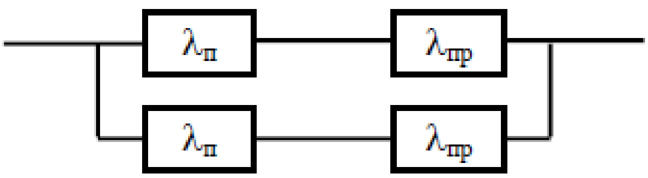

Рис.4.6

Задача 4.11. Схема расчета надежности изделия приведена на рис.4.7. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов изделия. Требуется определить интенсивность отказов изделия, если интенсивности отказов элементов имеют значения λ_1, λ_2.

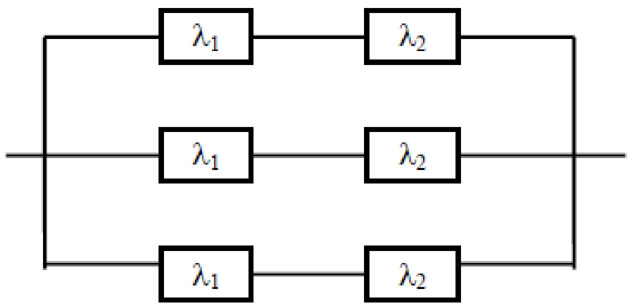

Рис.4.7

Задача 4.12. Нерезервированная система управления состоит из n = 4000 элементов. Известна требуемая вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ = 0,9 при t = 100 час. Необходимо 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.

Задача 4.13. Устройство обработки состоит из трех одинаковых блоков. Вероятность безотказной работы устройства $P_y(t_i)$ в течение (0, t_i) должна быть не менее 0,9. Определить, какова должна быть вероятность безотказной работы каждого блока в течение (0, 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.

Задача 4.14. Вычислитель состоит из двух блоков, соединенных последовательно и характеризующихся соответственно интенсивностями отказов λ_1=120,54•10^{-6} 1/час и λ_2=185,66•10^{-6} 1/час. Выполнено пассивное общее резервирование с неизменной нагрузкой всей системы (блока 1 и 2) (см.рис.4.8). Требуется определить вероятность безотказной работы P_c (t) вычислителя, среднее время безотказной работы m_{tc}, частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ вычислителя. Определить $P_c(t)$ при t = 20 час.

Раздел №5

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЗАМЕЩЕНИЕМ В РЕЖИМЕ ОБЛЕГЧЕННОГО (ТЕПЛОГО) РЕЗЕРВА И В РЕЖИМЕ НЕНАГРУЖЕННОГО (ХОЛОДНОГО) РЕЗЕРВА.

Теоретические сведения.

В этом случае резервные элементы находятся в облегченном режиме до момента их включения в работу. Надежность резервного элемента в этом случав выше надежности основного элемента, так как резервные элементы находятся в режиме недогрузки до момента их включения в работу.

Вероятность отказа резервированной системы с облегченным резервированием определяется соотношением

$$q_c(t) = 1 - e^{-\lambda_0 t}\left[1 + \sum_{i=1}^{m} \frac{a_i}{i!}\left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right)^i\right], \qquad (5.1)$$

где

$$a_i = \prod_{j=0}^{i-1}\left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1}\right). \qquad (5.2)$$

Здесь λ_1 - интенсивность отказа резервного элемента в режиме недогрузки до момента включения его в работу; λ_0 - интенсивность отказа резервного элемента в состоянии работы; m - кратность резервирования или количество резервных элементов. Вероятность безотказной работы системы с облегченным резервированием определяется формулой

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = e^{-\lambda_0 t}\left[1 + \sum_{i=1}^{m} \frac{a_i}{i!}\left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right)^i\right]. \qquad (5.3)$$

Определим среднее время безотказной работы системы с облегченным резервированием. Имеем

$$m_{tc} = \int_0^{\infty} P_c(t)dt = \frac{1}{\lambda_0}\sum_{i=0}^{m} \frac{1}{1 + ik}, \qquad (5.4)$$

где

$$k = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}. \qquad (5.5)$$

Определим частоту отказов $f_c(t)$ системы с облегченным резервированием.

Имеем

$$f_c(t) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t}\left[1+\sum_{i=1}^{m}\frac{a_i}{i!}\left(1-e^{-\lambda_1 t}\right)^i - \frac{\lambda_1}{\lambda_0}e^{-\lambda_1 t}\sum_{i=1}^{m}\frac{a_i}{(i-1)!}\left(1-e^{-\lambda_1 t}\right)^{i-1}\right]. \quad (5.6).$$

Определим интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ системы с облегченным резервированием.

Получим

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{p_c(t)} = \lambda_0\left[1-\frac{\lambda_1}{\lambda_0}e^{-\lambda_1 t}\frac{\sum_{i=1}^{m}\frac{a_i}{(i-1)!}\left(1-e^{-\lambda_1 t}\right)^{i-1}}{1+\sum_{i=1}^{m}\frac{a_i}{i!}\left(1-e^{-\lambda_1 t}\right)^i}\right]. \quad (5.7)$$

При λ_1 =0 имеем режим ненагруженного (холодного) резерва. Вероятность отказа резервированной системы с ненагруженным резервированием определяется соотношением

$$q_c(t) = 1-e^{-\lambda_0 t}\sum_{i=0}^{m}\frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}. \quad (5.8)$$

Вероятность безотказной работы системы с ненагруженным резервом определяется формулой

$$P_c(t) = 1-Q_c(t) = e^{-\lambda_0 t}\sum_{i=0}^{m}\frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}. \quad (5.9)$$

Определим среднее время безотказной работы системы с ненагруженным резервом. Имеем

$$m_{tc} = \int_0^\infty P_c(t)dt = \frac{m+1}{\lambda_0}. \quad (5.10)$$

Определим частоту отказов $f_c(t)$ системы с ненагруженным резервом.

Имеем

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = \frac{\lambda_0^{m+1}}{m!}t^m e^{-\lambda_0 t}. \quad (5.11)$$

Определим интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ системы с ненагруженным резервом.

Получим

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{\lambda_0^{m+1} t^m}{m! \sum_{i=0}^{m} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}. \qquad (5.12)$$

Задачи

<u>Задача 5.1.</u> 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. Необходимо найти вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$, среднее время безотказной работы системы m_{tc}, а также частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов λ_c (t) в момент времени t = 50 час в следующих случаях: а) нерезервированной системы, б) дублированной системы при включении резерва по способу замещения (ненагруженный резерв).

<u>Задача 5.2</u>. Радиопередатчик имеет интенсивность отказов λ_0=0,4•10^{-3} 1/час. Его дублирует такой же передатчик, находящийся до отказа основного передатчика в режиме ожидания (в режиме облегченного резерва). В этом режиме интенсивность отказов передатчика λ_1= 0,06•10^{-3} 1/час. Требуется вычислить вероятность безотказной работы передающей системы в течение времени t = 100 час., а также среднее время безотказной работы m_{tc}, частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов $\lambda_c(t)$.

<u>Задача 5.3.</u> Вероятность безотказной работы преобразователя постоянного тока в переменный в течении времени t=1000 час. равна 0,95, т. е. P(1000) = 0,95. Для повышения надежности системы электроснабжения на объекте имеется такой же преобразователь, который включается в работу при отказе первого (режим ненагруженного резерва). Требуется рассчитать вероятность безотказной работы и среднее время безотказной работы системы, состоящей из двух преобразователей, а также определить частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ системы.

<u>Задача 5.4</u>. Система состоит из двух одинаковых элементов. Для повышения ее надежности конструктор предложил дублирование системы по способу замещения с ненагруженным состоянием резерва (рис.5.1).

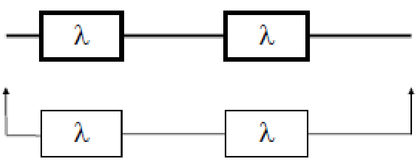

Рис.5.1

Интенсивность отказов элемента равна λ.Требуется определить вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$, среднее время безотказной работы m_{tc}, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $\lambda_c(t)$.

Задача 5.5. Схема расчета надежности изделия приведена на рис.5.2.

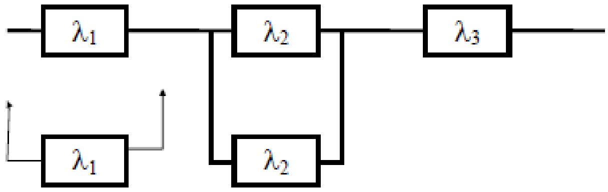

Рис.5.2

Необходимо определить вероятность безотказной работы $P_c(t)$, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ изделия. Найти $\lambda_c(t)$ при $t = 0$.

Задача 5.6. Схема расчета надежности системы приведена на рис.5.3, где А, Б, В, Г - блоки системы. Определить вероятность безотказной работы $P_c(t)$ системы.

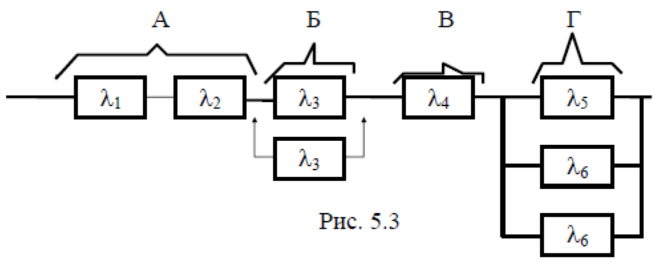

Рис.5.3

Задача 5.7. Схема расчета надежности системы приведена на рис.5.4. Определить вероятность безотказной работы Рс(t) системы.

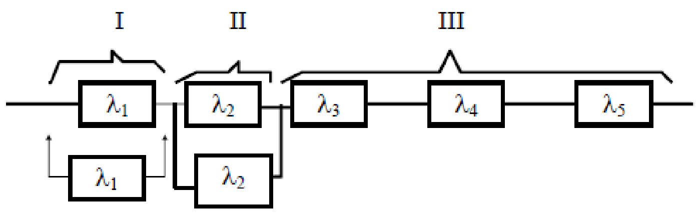

Рис.5.4

Задача 5.8. Передающее устройство состоит из одного работающего передатчика ($\lambda=8\cdot10^{-3}$ 1/час) и одного передатчика в облегченном резерве ($\lambda_0=8*10^{-4}$ 1/час). Требуется определить вероятность безотказной работы устройства $P_c(t)$, среднее время безотказной работы устройства m_{tc}. Определить $P_c(t)$ при t=20 час.

Задача 5.9. В радиопередающем канале связной системы используется основной передатчик $П_1$, два передатчика $П_2$ и $П_3$, находящиеся в ненагруженном резерве. Интенсивность отказов основного работающего передатчика равна $\lambda_0=10^{-3}$ 1/час. С момента отказа передатчика $П_1$ в работу включается $П_2$, после отказа передатчика $П_2$ включается $П_3$. При включении резервного передатчика в работу его интенсивность отказов становится равной λ_0. Считая переключатель абсолютно надежным, определить вероятность безотказной работы $P_c(t)$

радиопередающего канала, среднее время безотказной работы m_{tc} канала. Определить также $P_c(t)$ при t=100 час.

Задача 5.10. Устройство автоматического поиска неисправностей состоит из двух логических блоков. Среднее время безотказной работы этих блоков одинаково и для каждого из них равно m_t= 200 час. Требуется определить среднее время безотказной работы устройства m_{tc} для двух случаев: а) имеется ненагруженный резерв всего устройства; б) имеется ненагруженный резерв каждого блока.

Раздел №6

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ С ПОЭЛЕМЕНТНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ.

Теоретические сведения

При поэлементном резервировании резервируются отдельно элементы системы (рис.6.1.). Определим количественные характеристики надежности системы.

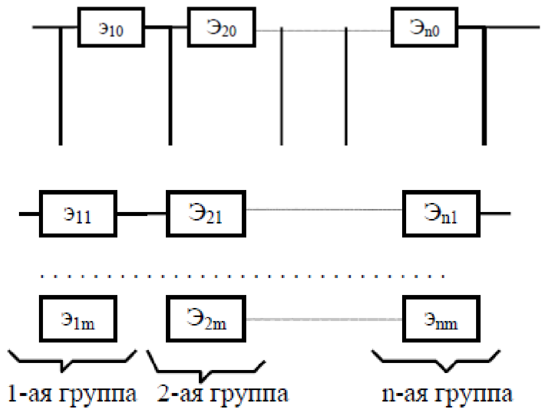

Рис.6.1

Запишем вероятность отказа i - ой группы. Имеем

$$Q_i(t) = \prod_{j=0}^{m} Q_{ij}(t) \quad i = \overline{1,n}, \qquad (6.1)$$

где $Q_{ij}(t)$ - вероятность отказа элемента $Э_{ij}$ на интервале времени (0, t).

Запишем вероятность безотказной работы j-ой группы. Получим

$$P_i(t) = 1 - Q_i(t) = 1 - \prod_{j=o}^{m_i} \left[1 - P_{ij}(t)\right]; \; i = \overline{1,n}, \qquad 6.2)$$

где $P_{ij}(t)$ - вероятность безотказной работы элемента $Э_{ij}$ на интервале времени (0,t); m_i - кратность резервирования элемента j-ой группы.

Запишем вероятность безотказной работы системы с поэлементным резервированием

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t)$$

или

$$P_c(t)=\prod_{i=1}^{n}\left\{1-\prod_{j=0}^{m_i}\left[1-P_{ij}(t)\right]\right\}. \tag{6.3}$$

Для равнонадежных элементов системы и m_i=m=const имеем

$$P_{ij}(t)=P(t); \tag{6.4}$$

$$P_c(t) =\left[1-\left[1-P(t)\right]^{m+1}\right]^{n} \tag{6.5}$$

Если

$$P_{ij}(t)=P_i(t), \tag{6.6}$$

то формула (6.3) примет вид

$$P_c(t)=\prod_{i=1}^{n}\left\{1-\left[1-P_i(t)\right]^{m_i+1}\right\} \tag{6.7}$$

При экспоненциальном законе надежности, когда $P_i(t)=e^{-lit}$,

$$P_c(t)=\prod_{i=1}^{n}\left\{1-\left[1-e^{-\lambda_i t}\right]^{m_i+1}\right\}. \tag{6.8}$$

В этом случае формула (6.5) примет вид

$$P_c(t)=\left\{1-\left[1-e^{-\lambda t}\right]^{m+1}\right\}^{n}, \tag{6.9}$$

а среднее время безотказной работы системы определяется соотношением

$$m_{tc}=\int_0^{\infty}P_c(t)dt. \tag{6.10}$$

Подставляя (6.9) в (6.10), получим

$$m_{tc}=\frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)}\sum_{j=0}^{m}\frac{1}{\nu_j(\nu_j+1)\ldots(\nu_j+n-1)}, \tag{6.11}$$

где:ν_j=(j+1)/(m+1).

Задачи

Задача 6.1. Для повышения надежности усилителя все его элементы дублированы. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов системы. Необходимо найти вероятность безотказной работы усилителя в течение t =5000 час. Состав элементов нерезервированного усилителя и данные по интенсивности отказов элементов приведены в табл.6.1.

Таблица 6.1.

Элементы	Количество элементов	Интенсивность отказов элемента λ, 10^{-5} 1/час
Транзисторы	1	2,16
Резисторы	5	0,23
Конденсаторы	3	0,32
Диоды	1	0,78
Катушки индуктивности	1	0,09

Задача 6.2. Схема расчета надежности резервированного устройства приведена на рис.6.2.

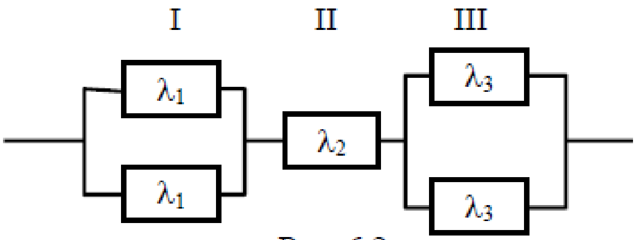

Рис.6.2

Интенсивности отказов элементов имеют следующие значения:

λ_1=0,23•10^{-3} 1/час; λ_2=0,5•10^{-4} 1/час; λ_3=0,4•10^{-3} 1/час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов системы. Необходимо найти среднее время безотказной работы устройства, вероятность безотказной работы устройства, интенсивность отказов устройства.

Задача 6.3. Схема расчета надежности устройства приведена на рис. 6.3.

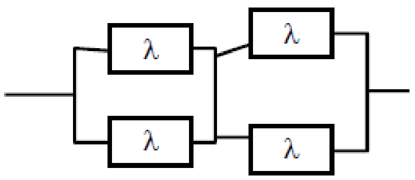

Рис.6.3

Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности, для элементов устройства и все элементы устройства равнонадежны. Интенсивность отказов элемента λ = 1,33•10^{-3}1/час. Требуется определить $f_c(t)$, m_{tc}, $P_c(t)$, $\lambda_c(t)$ резервированного устройства.

Задача 6.4. Нерезервированная система управления состоит из n=5000 элементов. Для повышения надежности системы предполагается провести раздельное дублирование элементов. Чтобы приближенно оценить возможность достижения заданной вероятности безотказной работы системы $P_c(t) = 0,9$ при $t = 10$ час, необходимо рассчитать среднюю интенсивность отказов одного элемента при предположении отсутствия последействия отказов.

Задача 6.5. Схема расчета надежности устройства показана на рис.6.4.

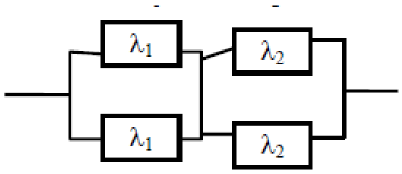

Рис. 6.4

Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов устройства. Интенсивности отказов элементов имеет следующие значения λ_1=0,3•10^{-3} 1/час, λ_2=0,7•10^{-3} 1/час. Необходимо определить вероятность безотказной работы устройства в течении времени $t = 100$ час.

Задача 6.7. В телевизионном канале связи, состоящем из приемника и передатчика, применено раздельное дублирование передатчика и приемника. Передатчик и приемник имеют интенсивности отказов $\lambda_п$=2•10^{-3} 1/час и $\lambda_{пр}$=1•10^{-3} 1/час соответственно. Схема канала представлена на рис.6.6.

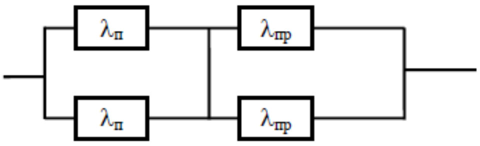

Рис.6.6

Требуется определить вероятность безотказной работы канала $P_c(t)$, среднее время безотказной работы m_{tc}, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $\lambda_c(t)$.

Задача 6.8. Схема расчета надежности системы приведена на рис.6.7.,

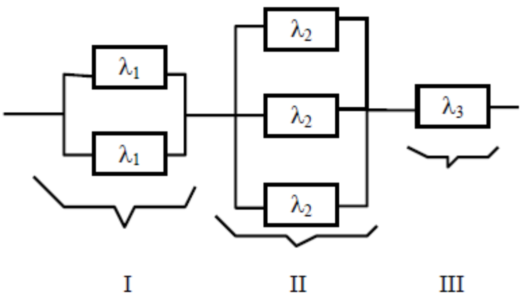

Рис.6.7

где также приведены интенсивности отказов элементов. Требуется определить вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ и частоту отказов $f_c(t)$.

Задача 6.9. Радиоэлектронная аппаратура состоит из трех блоков: I, II и III. Интенсивности отказов для этих трех блоков соответственно равны: λ_1, λ_2, λ_3.

Требуется определить вероятность безотказной работы аппаратуры Pc(t) для следующих случаев: а) резерв отсутствует; б) имеется дублирование каждого блока.

Задача 6.10. Нерезервированная система управления состоит из n =4000 элемвнтов. Известна требуемая вероятность безотказной работы системы $P_c(t)=0{,}9$ при t=100 час. Необходимо 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 раздельное (поэлементное) дублирование.

Задача 6.11. В радиопередатчике, состоящем из трех равнонадежных каскадов (n=3) применено раздельное дублирование каждого каскада. Интенсивность отказов каскадов равна $\lambda =5\cdot10^{-4}$ 1/час. Рассчитать вероятность безотказной работы $P_c(t)$ в течение времени t = 100 час и среднее время безотказной работы m_{tc} радиопередатчика.

Задача 6.12. Вычислитель состоит из двух блоков, соединенных последовательно и характеризуется соответственно интенсивностями отказов $\lambda_1=120{,}54\cdot10^{-6}$ *1/час*и $\lambda_2=185{,}66\cdot10^{-6}$ *1/час.* Выполнено пассивное поэлементное резервирование с неизменной нагрузкой блока 2 (см. рис. 6.8). Требуется определить вероятность безотказной работы $P_c(t)$ вычислителя, среднее время безотказной работы m_{tc}, частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ вычислителя. Определить $P_c(t)$ при t=20 час.

Задача 6.13. Вычислительное устройство состоит из n=3 одинаковых блоков, к каждому из которых подключен блок в нагруженном резерве. Интенсивность отказов каждого блока равна $\lambda=10^{-4}$ *1/час*. Требуется определить вероятность безотказной работы $P_c(t)$ устройства и среднее время безотказной работы устройства m_{tc}.

Раздел № 7.

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ С ДРОБНОЙ КРАТНОСТЬЮ И ПОСТОЯННО ВКЛЮЧЕННЫМ РЕЗЕРВОМ.

Теоретические сведения.

Резервированная система состоит из l отдельных систем (рис. 7.1.).

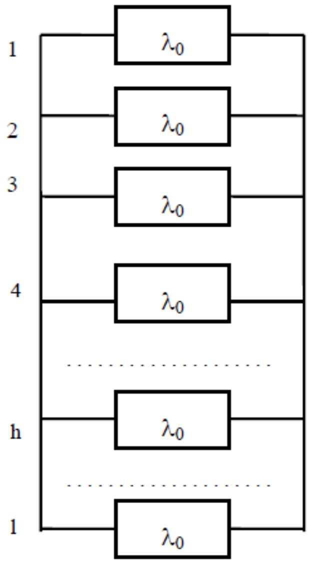

Рис. 7.1

Для ее нормальной работы необходимо, чтобы исправными были не менее чем h систем. Кратность резервирования такой системы равна

$$m = \frac{l-h}{h} \tag{7.1}$$

Предполагается, что основные и все резервные системы равнонадёжны. Вероятность безотказной работы, резервированной системы:

$$P_C(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i P_0^{l-i}(t) \sum_{j=0}^{i} (-1)^j C_i^j P_0^j(t)$$

где:

$$C_l^i = \frac{l!}{i!(l-i)!}. \tag{7.2}$$

Здесь $P_o(t)$ – вероятность безотказной работы основной системы или любой резервной системы;

l – общее число основных и резервных систем;

h – число систем, необходимых для нормальной работы.

На рис. 7.1 λ_o есть интенсивность отказов любой одной из систем. Будем предполагать, что для любой отдельно взятой системы справедлив экспоненциальный закон надежности, т.е.

$P_0(t) = e^{-\lambda_0 t}$	(7.3)

Определим среднее время безотказной работы системы. Имеем

$m_{tc} = \int\limits_0^\infty P_c(t)dt = \dfrac{1}{\lambda_0}\sum\limits_{i=0}^{l-h}\dfrac{1}{h+i}$	(7.4)

Задачи

Задача 7.1. Система электроснабжения блока ЭВМ состоит из четырех генераторов, номинальная мощность каждого из которых 18 квт. Безаварийная работа блока еще возможна, если система электроснабжения может обеспечивать потребителя мощностью 30 квт. Необходимо определить вероятность безотказной работы системы энергоснабжения в течение времени $t = 600$ *час*, среднее время безотказной работы m_{tc}, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ системы энергоснабжения, если интенсивность отказов каждого из генераторов $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ *1/час*.

Задача 7.2. Для повышения точности измерения некоторой величины применена схема группирования приборов из пяти по три, т.е. результат измерения считается верным по показанию среднего (третьего) прибора. Требуется найти вероятность безотказной работы $P_c(t)$, среднее время безотказной работы m_{tc} такой системы, а также частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ системы, если интенсивность отказов каждого прибора $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-3}$ *1/час*.

Задача 7.3. Интенсивность отказов измерительного прибора $\lambda=0.83 \cdot 10^{-3}$ *1/час*. Для повышения точности измерения применена схема группирования из трех по два (m=1/2). Необходимо определить вероятность безотказной работы схемы $P_c(t)$, среднее время безотказной работы схемы m_{tc}, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ схемы.

Задача 7.4. Интенсивность отказов измерительного прибора $\lambda=0.83 \cdot 10^{-3}$ *1/час*. Для повышения точности измерения применена схема группирования из пяти по три (m=2/3). Необходимо определить вероятность безотказной работы схемы $P_c(t)$, частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ схемы.

Задача 7.5. Автомобильный двигатель имеет $l=4$ свечи зажигания по одной на каждый цилиндр. Интенсивность отказов свечи $\lambda=10^{-3}$ *1/час*, а длительность работы двигателя в течение всего путешествия $t=20$ *час*. Предполагается, что автомобиль может ехать также при одном неработающем цилиндре. Необходимо определить вероятность безотказной работы двигателя $P_c(t)$, среднее время безотказной работы двигателя m_{tc} , частоту отказов $f_c(t)$, интенсивность отказов

$\lambda_c(t)$ двигателя. Какова вероятность того, что автомобиль доставит туристов в пункт назначения без замены свечей?

Задача 7.6. В вычислительном устройстве применено резервирование с дробной кратностью “один из трех”. Интенсивность отказов одного нерезервированного блока равна: $\lambda_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ $1/час$. Требуется рассчитать вероятность безотказной работы устройства P_c (t) и среднее время безотказной работы m_{tc} резервированного вычислительного устройства.

Нормированная функция Лапалса

U	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	00399	00798	01197	01595	01994	02892	02790	03188	03586
0,1	03983	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026	11409
0,3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	15173
0,4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18439	18793
0,5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240
0,6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490
0,7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524
0,8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327
0,9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	33891
1,0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214
1,1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100	38298
1,2	38493	38686	38877	39065	39251	89435	39617	39796	39973	40147
1,3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41308	41466	41621	41774
1,4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189
1,5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408
1,6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45449
1,7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327
1,8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062
1,9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670
2,0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169
1	48214	48257	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537	48574
2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870	48899
3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158
4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361
5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49422	49506	49520
6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632	49643
7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736
8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807
9	49813	49819	49825	49831	49336	49841	49846	49851	49856	49861
3,0	49865									
3,5	4997674									
4,0	4999683									
4,5	4999966									
5,0	4999997 133									

$$\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{2} erf\left(\frac{U}{\sqrt{2}}\right)$$

* Ф(U) - обозначается функция Лапласа.
erf - функция ошибок

Приложение Б

Таблица значений функции

$$\varphi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$

x	$\varphi_0(x)$	x	$\varphi_0(x)$	x	$\varphi_0(x)$	x	$\varphi_0(x)$
0.00	0.3989	1.00	0.2420	2.00	0.0540	3.00	0.0044
0.05	0.3984	1.05	0.2299	2.05	0.0488	3.05	0.0038
0.10	0.3970	1.10	0.2179	2.10	0.0440	3.10	0.0033
0.15	0.3945	1.15	0.2059	2.15	0.0396	3.15	0.0028
0.20	0.3910	1.20	0.1942	2.20	0.0355	3.20	0.0024
0.25	0.3867	1.25	0.1826	2.25	0.0317	3.25	0.0020
0.30	0.3814	1.30	0.1714	2.30	0.0283	3.30	0.0017
0.35	0.3752	1.35	0.1604	2.35	0.0252	3.35	0.0015
0.40	0.3683	1.40	0.1497	2.40	0.0224	3.40	0.0012
0.45	0.3605	1.45	0.1394	2.45	0.0198	3.45	0.0010
0.50	0.3521	1.50	0.1295	1.50	0.0175	1.50	0.0009
0.55	0.3429	1.55	0.1200	2.55	0.0154	3.55	0.0007
0.60	0.3332	1.60	0.1109	2.60	0.0136	3.60	0.0006
0.65	0.3230	1.65	0.1023	2.65	0.0119	3.65	0.0005
0.70	0.3123	1.70	0.0940	2.70	0.0104	3.70	0.0004
0.75	0.3011	1.75	0.0863	2.75	0.0091	3.75	0.0003
0.80	0.2897	1.80	0.0790	2.80	0.0079	3.80	0.0002
0.85	0.2780	1.85	0.0721	2.85	0.0069	3.85	0.0002
0.90	0.2661	1.90	0.0656	2.90	0.0060	3.90	0.0002
0.95	0.2541	1.95	0.0596	2.95	0.0051	3.95	0.0002
						4.00	0.0001

Таблица значений и свойства гамма-функции

$$\Gamma(p) = \int_0^{+\infty} x^{p-1} e^{-x} dx$$

p	Г(p)	p	Г(p)	p	Г(p)	p	Г(p)
1,00	1,0000	**1,25**	0,9064	**1,50**	0,8862	**1,75**	0,9191
1,01	0,9943	**1,26**	9044	**1,51**	8866	**1,76**	9214
1,02	9888	**1,27**	9025	**1,52**	8870	**1,77**	9238
1,03	9835	**1,28**	9007	**1,53**	8876	**1,78**	9262
1,04	9784	**1,29**	8990	**1,54**	8882	**1,79**	9288
1,05	9735	**1,30**	8975	**1,55**	8889	**1,80**	9314
1,06	9687	**1,31**	8960	**1,56**	8896	**1,81**	9341
1,07	9642	**1,32**	8946	**1,57**	8905	**1,82**	9368
1,08	9597	**1,33**	8934	**1,58**	8914	**1,83**	9397
1,09	9555	**1,34**	8922	**1.59**	8924	**1,84**	9426
1,10	9514	**1,35**	8912	**1,60**	8935	**1,85**	9456
1,11	9474	**1,36**	8902	**1,61**	8947	**1,86**	9187
1,12	9436	**1,37**	8893	**1,62**	8959	**1,87**	9518
1,13	9399	**1,38**	8885	**1,63**	8972	**1,88**	9551
1,14	9364	**1,39**	8879	**1,64**	8986	**1,89**	9584
1,15	9330	**1,40**	8873	**1,65**	9001	**1,90**	9618
1,16	9298	**1,41**	8868	**1,66**	9017	**1,91**	9652
1,17	9267	**1,42**	8864	**1,67**	9033	**1,92**	9688
1,18	9237	**1,43**	8860	**1,68**	9050	**1,93**	9724
1,19	9209	**1,44**	8858	**1,69**	9068	**1,94**	9761
1,20	9182	**1,45**	8857	**1,70**	9086	**1,95**	9799
1,21	9156	**1,46**	8856	**1,71**	9106	**1,96**	9837
1,22	9131	**1,47**	8856	**1,72**	9126	**1,97**	9877
1,23	9108	**1,48**	8857	**1,73**	9147	**1,98**	9917
1,24	9030	**1,49**	8859	**1,74**	9168	**1,99** **2,00**	9959 1,0000

Свойства Г(p):

1. Интеграл имеет конечную величину при p > 0.

2. Г(p+1)=pГ(p).

3. Г(n) = (n-1)!, n ∈ N; Г(1) = Г(2) = 1

4. $\Gamma(p)\Gamma(1-p)=\dfrac{\pi}{\sin p\pi}, p \notin Z$; $\Gamma\left(\dfrac{1}{2}\right)=\sqrt{\pi}$; $\Gamma\left(\dfrac{3}{2}\right)=\dfrac{\sqrt{\pi}}{2}$