Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра безопасности жизнедеятельности

Н.Н. Рахимова

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕНЫЙ РИСК

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность

Оренбург
2015

УДК 62-192:504(076.5)
ББК 30.14я7+20.1я7
Р 27

Рецензент - кандидат технических наук, доцент В.А. Солопова

Рахимова, Н.Н.

Р 27 Надежность технических систем и техногенный риск: методические указания / Н.Н.Рахимова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2015. – 70 с.

Методических указания содержат сведения необходимые для выполнения курсовых работ, проведения расчётов. Содержат теоретическую часть, примеры решения в программе Excel, MATCAD, индивидуальные задания, порядок оформления.

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 20.03.01 – «Техносферная безопасность», при изучении дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск».

УДК 62-192:504(076.5)
ББК 30.14я7+20.1я7

Содержание

Введение

Основные цели и задачи курсовой работы

Основные цели курсовой работы:

- углубленное изучение надежности технических систем;

- приобретение навыков и умений применения основ надежности при проектировании технических систем;

- умение применять методы повышения надежности, в конкретных условиях, для выбора и проектирования, оптимальной структурной системы, удовлетворяющей требованием надежности.

Для достижения указанных целей в курсовой работе студенты должны:

- знать и уметь рассчитывать основные количественные характеристи надежности технических систем;

- владеть навыками расчета технических систем в различными видами резервирования;

- владеть методикой расчета оптимальной структурной схемы, удовлетворяющую требованиям надежности;

- уметь определять кратность резервирования, обеспечивающего требования надежности.

Курсовая работа должна содержать:

- титульный лист;

- постановку задачи - задание на курсовую работу;

- содержание;

- введение;

- теоретическую часть;

- расчетная часть, выполняется по вариантам, необходимо выполнить индивидуальное расчетное задание. Расчеты производятся с помощью компьютерных технологий в программе Excel, MATCAD, результаты сводятся в таблицу. В записке должны содержаться, подробные расчеты характеристик надежности элементов и технической системы;

- графическое представление результатов;
- выводы и результаты;
- библиографический список.

Для защиты, курсовая работа должна быть представлена в виде слайдов в программе POWER POINT, не менее 10 слайдов.

Курсовая работа оформляется согласно требований СТО 02069024.101 – 2014.

На графический материал выносятся:

- цели и задачи курсовой работы;
- исходные данные (постановка задачи);
- результаты расчетов в виде таблиц и графиков, распределения основных количественных характеристик надежности исходной системы;
- оптимальные резервируемые структурные схемы системы, по видам применяемого резервирования, удовлетворяющие требованиям надежности;
- выводы и результаты.

1 Тема «Синтез оптимальной структуры технической системы по обеспечению ее надежности»

1.1 Постановка задачи:

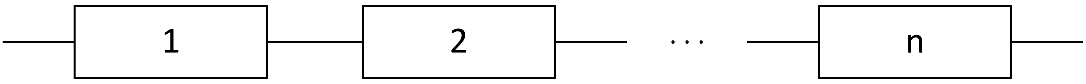


Рисунок 1 – Структурная схема с основным соединением элементов

- структурная схема, с последовательным соединением элементов;

n - число элементов в системе;

t - время непрерывной работы системы;

λ_i, $i = 1,2,...,n$ - интенсивность отказа элементов исходной системы;

$t_{вi}$, $i = 1,2,...,n$ - среднее время восстановления элементов исходной системы;

R_c - коэффициент оперативной готовности.

Требуется определить:

- оптимальную структурную систему, удовлетворяющую требованием надежности;

- основные количественные характеристики надежности системы: вероятность безотказной работы $P_c(t)$, среднее время безотказной работы T_C, коэффициент оперативной готовности системы $K_{ГС}$.

Оптимальной следует считать структурную схему, удовлетворяющую требованием надежности и имеющую минимальное число резервных элементов.

Распределение отказов восстановление отказавших элементов подчиняется экспоненциальному закону распределения.

1.2 Индивидуальные задания для выполнения курсовой работы

Для выполнения курсовой работы, студент выбирает вариант, согласно, последней цифры в зачетной книжке. Для всех вариантов задания $n = 10$, $t = 10$ час, $R_c = 0{,}95$. Значения интенсивности отказов λ_i и среднее время восстановления элементов $t_{вi}$,приведены в таблице А.1.

1.3 Методика решения

Для обеспечения требуемой надежности R_c=0,95 используется структурная избыточность.

Допускается применение любого ее вида. При этом рекомендуется следующая последовательность решения задачи:

1) анализ надежности исходной системы;

2) определение кратности общего резервирования, обеспечивающего требования надежности;

3) определение кратности раздельного резервирования, обеспечивающего требования надежности при минимальном числе резервных элементов;

4) определение показателей надежности системы оптимальной структуры.

1.4 Анализ надежности системы

Коэффициент оперативной готовности определяется выражением:

$$R_c = \frac{1}{T + T_B} \int\limits_{00}^{\infty} P_C(t + x)dx = K_{ГС} \cdot \frac{1}{T} \int\limits_{0}^{\infty} P_C(t + x)dx \qquad (1.1)$$

Для экспоненциального распределения выражение (1.1) можно заменить приближенно оценкой:

$$R_C(t) = K_{ГС} P_C(t) \quad (1.2)$$

где $K_{ГС}$ – коэффициент готовности системы;

$P_C(t)$ – вероятность безотказной работы системы в течение времени t.

Коэффициент готовности системы вычисляется по формуле:

$$K_{ГС}(t) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\mu_i}} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \rho_i} \quad (1.3)$$

Вероятность безотказной работы системы при условии независимости отказов ее элементов определяется по формуле:

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t) \quad (1.4)$$

где $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i-го элемента.

Предполагается, что интенсивность отказов элементов есть величина постоянная. Тогда

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i(t)} \quad (1.5)$$

$$P_i(t) = e^{-\lambda_C(t)} \quad (1.6)$$

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{1.7}$$

Расчеты необходимо свести в таблицу 1.

Одновременно с расчетом коэффициента оперативной готовности системы рассчитываются коэффициент готовности и вероятность безотказной работы элементов системы.

По данным занесенным в таблицу, определяют показатели надежности системы $P_c(t)$, $K_{ГС}$, R_c.

Таблица 1– Результаты вычислений основных количественных характеристик надежности

Элементы системы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ_i ч $^{-1}$										
$t_{вi}$, ч										
ρ_i										
$P_i(t)$										
$K_{ГС}$										

1.5 Определение кратности общего резервирования

Определение кратности m общего резервирования с постоянно включенным резервом осуществляется путем решения следующего трансцендентного уравнения:

$$R_C = \left(1-\left(1-P_C(t)\right)^{m+1}\right)\cdot\left(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m+1}\frac{1}{i!\rho_C^i}}\right) \qquad (1.8)$$

1.6 Определение кратности раздельного резервирования

Методика определения кратности раздельного резервирования состоит в следующем: по данным расчета надежности исходной системы выбирается наименее надежный элемент (у которого ρ_C наименьший) и дублируется таким же элементом методом постоянного резервирования.

Выполняется расчет надежности системы новой структуры, то есть структуры с одним дублированным элементом. Если надежность новой системы не удовлетворяет требуемой ($R_C \geq 0{,}95$), то выбирается следующий наименее надежный элемент, который также дублируется, и вновь ведется расчет надежности системы теперь уже с двумя резервными элементами. Вновь проверяется условие $R_C \geq 0{,}95$ и так далее, до тех пор, пока условие не будет выполнено.

Если в процессе такого последовательного приближения окажется, что наименее надежным является уже дублированный элемент, то его резервируют еще раз.

Если условие $R_C \geq 0{,}95$ выполнено, то считается, что оптимальная структура найдена. Теперь следует определить число ее элементов и вычислить показатели надежности.

1.7 Определение показателей надежности оптимальной системы

Вероятность и среднее время безотказной работы оптимальной системы рассчитываются по методам, известным в теории надежности. Коэффициент готовности и наработка на отказ восстанавливаемой системы при большой кратности резервирования могут быть вычислены одним из приближенных методов. Предпочтительным является метод, основанный на допущении независимости восстановления элементов системы.

Расчетная формула для случая равнонадежных систем и постоянной интенсивности отказов элементов $\lambda_0=\lambda_1=\ldots=\lambda_m=\lambda$ (такая система дана по заданию). В этом случае вероятность безотказной работы системы определяется по формуле

$$P_c(t) = 1-(1-P(t))^{m+1} = 1-(1-e^{-\lambda t})^{m+1}. \qquad (1.9)$$

Выражение для интенсивности отказов системы легко получить из соотношения:

$$\lambda_c(t) = -\frac{P_c'(t)}{P_c(t)}. \qquad (1.10)$$

Подставляя в это соотношение $P_c(t)$ из формулы и его производную, получим формулу :

$$\lambda_c(t) = \frac{(m+1)\lambda e^{-\lambda t}(1-e^{-\lambda t})^m}{1-(1-e^{-\lambda t})^{m+1}}. \qquad (1.11)$$

Из выражения видно, что $\lambda_c(0)=0$ и с ростом t увеличивается.

1.8 Алгоритм анализа и синтеза оптимальной системы

Алгоритмы анализа и синтеза оптимальной структуры системы представляют собой совокупность математических выражений и формул, позволяющих рассчитать показатели надежности исходной системы и определить кратность различных видов резервирования, обеспечивающих требования надежности, а также позволяющих рассчитать показатели надежности оптимальной системы.

Алгоритмы анализа надежности исходной системы выглядят следующим образом:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \,, \tag{1.12}$$

$$\rho_i = \lambda_i t_{\text{в}i}, i = 1,2,...,n, \tag{1.13}$$

$$\rho_c = \sum_{i=1}^{n} \rho_i \,, \tag{1.14}$$

$$p_i(t) = e^{-\lambda_c t} \,, \tag{1.15}$$

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t) \,,\ P_c(t) = e^{-\lambda_c t} \,, \tag{1.16}$$

$$K_{\Gamma i} = \frac{1}{1+\rho_i}, i = 1,2,\ldots,n \,, \tag{1.17}$$

$$K_{\Gamma C} = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{n}\rho_i} = \frac{1}{1+\rho_c} \,, \tag{1.18}$$

$$R_c = K_{\Gamma C} P_c(t) \,. \tag{1.19}$$

Алгоритм определения кратности общего резервирования для постоянно включенного резерва следующий

$$R_{\text{пос}} = (1-(1-P_c(t))^{m+1})(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{i!\rho_c{}^{i}}}) \,. \tag{1.20}$$

Кратность раздельного постоянного резервирования оптимальной системы определяется по формулам:

$$V_p = (1-(1-p_1)^{m_1+1}, 1-(1-p_2)^{m_2+1}, \ldots, 1-(1-p_n)^{m_n+1},$$
$$(1-(1-p_1)^{m_1+1})(1-(1-p_2)^{m_2+1})\ldots(1-(1-p_n)^{m_n+1})), \tag{1.21}$$

$$V_{K_{\tilde{a}}} = (1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_1+1}\frac{1}{i!\rho_1{}^i}}, 1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_2+1}\frac{1}{i!\rho_2{}^i}}, \ldots, 1-\frac{1}{1+\sum_{n}^{m_n+1}\frac{1}{i!\rho_n{}^i}}),$$
$$(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_1+1}\frac{1}{i!\rho_1{}^i}})(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_2+1}\frac{1}{i!\rho_2{}^i}})\ldots(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_n+1}\frac{1}{i!\rho_n{}^i}})). \tag{1.22}$$

Значение коэффициента оперативной готовности определяется как произведение последних элементов векторов V_p и $V_{Кг}$.

Кратность раздельного резервирования замещением определяется по формулам:

$$V_p = (p_1(t)\sum_{i=0}^{m_1}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}, p_2(t)\sum_{i=0}^{m_2}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}, \ldots, p_n(t)\sum_{i=0}^{m_n}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}),$$
$$P_c(t)\sum_{i=0}^{m_1}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}, p_2(t)\sum_{i=0}^{m_2}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}, \ldots, p_n(t)\sum_{i=0}^{m_n}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}))$$

(1.23)

$$V_{K_{г}} = (1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_1+1}\frac{1}{\rho_1{}^i}}, 1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_2+1}\frac{1}{\rho_2{}^i}}, \ldots, 1-\frac{1}{1+\sum_{n}^{m_n+1}\frac{1}{\rho_n{}^i}}),$$
$$(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_1+1}\frac{1}{\rho_1{}^i}})(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_2+1}\frac{1}{\rho_2{}^i}})\ldots(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_n+1}\frac{1}{\rho_n{}^i}})). \tag{1.24}$$

1.9 Пример решения

Исходная система состоит из 10 последовательно соединенных элементов: $n = 10$, $t = 10$ ч, $R_c = 0{,}95$. Значения интенсивности отказов λ_i и среднее время восстановления элементов $t_{вi}$,приведены в таблице 1.

Таблица 2 – Исходные данные

Номер варианта		Номер элемента системы									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
В 5	λ_i	2,5	1,6	0,7	2,5	6	1,5	0,9	2,5	4,8	3
	$t_{вi}$	10	12	9	9,6	18	5,2	6	8	10	1

П р и м е ч а н и е – Интенсивность отказов элементов системы в таблице в масштабе $\lambda \cdot 10^{-3}$ ч$^{-1}$, размерность $t_{вi}$ - в часах

Алгоритмы анализа и синтеза оптимальной структуры системы представляют собой совокупность математических выражений и формул, позволяющих рассчитать показатели надежности исходной системы и определить кратность различных видов резервирования, обеспечивающих требования надежности, а также позволяющих рассчитать показатели надежности оптимальной системы.

Анализ надежности исходной системы проведен с помощью программы MS Excel и выглядят следующим образом:

1 Определяем интенсивность отказа технической системы

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{1.25}$$

В строке формул вводим «СУММ(B6:B15)» и получаем результат.

	A	B
5	№ эл	λ_i
6	1	0,0025
7	2	0,0016
8	3	0,0007
9	4	0,0025
10	5	0,006
11	6	0,0015
12	7	0,0009
13	8	0,0025
14	9	0,0048
15	10	0,003
16		0,026

$$\lambda_с = (2,5+1,6+0,7+2,5+6+1,5+0,9+2,5+4,8+3)\cdot 10^{-3} = 0,026 \text{ ч}^{-1}. \quad (1.26)$$

2 Определяем вспомогательный коэффициент

$$\rho_i = \lambda_i t_{вi}, i = 1,2,\ldots,n \quad (1.27)$$

В строке формул вводим «ПРОИЗВЕД(B6:C6)» и применяем для ячеек от B6 до B15.

p_1= 0,0025*10=0,0025;

p_2 = 0,0016*12=0,0192;

p_3 = 0,0007*9 = 0,0063;

p_4 = 0,0025*9,6 = 0,024;

p_5 = 0,006*18 = 0,108;

p_6 = 0,0015*5,2 = 0,0078;

p_7 =0,009*6 = 0,0054;

p_8 = 0,0025*8 = 0,02;

p_9 = 0,0048*10 = 0,048;

p_{10} = 0,003*1 = 0,003.

3 Определяем суммарный вспомогательный коэффициент

$$\rho_c = \sum_{i=1}^{n} \rho_i\ ; \qquad (1.28)$$

в строке формул вводим «СУММ(Е6:Е15)».

E16 =СУММ(E6:E15)

	B	C	D	E	F
5	λ_i	t_{ei}	λ_c	ρ_i	ρ_c
6	0,0025	10	0,026	0,025	0,2667
7	0,0016	12		0,0192	
8	0,0007	9		0,0063	
9	0,0025	9,6		0,024	
10	0,006	18		0,108	
11	0,0015	5,2		0,0078	
12	0,0009	6		0,0054	
13	0,0025	8		0,02	
14	0,0048	10		0,048	
15	0,003	1		0,003	
16	0,026			0,2667	

$\sum_i^n p_i$= 0,025+0,0192+0,0063+0,024+0,108+0,0078+0,0054+0,02+0,0048+0,003=0,2667.

4 Определяем вероятность безотказной работы, каждого элемента в системе

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i t}\ ; \qquad (1.29)$$

в строке формул вводим «EXP(-B6*10)» для всех значений λ.

$p_1(t) = \exp^{(-0,0025*10)} = 0,9753;$

$p_2(t) = \exp^{(-0,0016*10)} = 0,9841;$

$p_3(t) = \exp^{(-0,0007*10)} = 0,9930;$

$p_4(t) = \exp^{(-0,0025*10)} = 0,9753;$

$p_5(t) = \exp^{(-0,006*10)} = 0,9418;$

$p_6(t) = \exp^{(-0,0015*10)} = 0,9851;$

$p_7(t) = \exp^{(-0,0009*10)} = 0,9910;$

$p_8(t) = \exp^{(-0,0025*10)} = 0,9753;$

$p_9(t) = \exp^{(-0,0048*10)} = 0,9531;$

$p_{10}(t) = \exp^{(-0,003*10)} = 0,9704.$

5 Определяем вероятность безотказной работы системы

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t)\,,\; P_c(t) = e^{-\lambda_c t}\,; \tag{1.30}$$

В строке формул вводим «ПРОИЗВЕД(G6:G15) или EXP(-D6*10)».

	B	C	D	E	F	G	H
5	λ_i	$t_{\ \ \ si}$	λ_c	ρ_i	ρ_c	$P_i(t)$	$P_c(t)$
6	0,0025	10	0,026	0,025	0,2667	0,9753099	0,771052
7	0,0016	12		0,0192		0,9841273	
8	0,0007	9		0,0063		0,9930244	
9	0,0025	9,6		0,024		0,9753099	
10	0,006	18		0,108		0,9417645	
11	0,0015	5,2		0,0078		0,9851119	
12	0,0009	6		0,0054		0,9910404	
13	0,0025	8		0,02		0,9753099	
14	0,0048	10		0,048		0,9531338	
15	0,003	1		0,003		0,9704455	
16	0,026			0,2667		0,7710516	

$P_c(t)$= =EXP(-0,026*10)= 0,771052.

6 Определяем коэффициент готовности каждого элемента в системе

$$K_{\Gamma i} = \frac{1}{1+\rho_i}, i = 1,2,...,n\,; \tag{1.31}$$

в строке формул вводим «1/СУММ(1;Ei)».

I6 fx =1/СУММ(1;E6)

	E	F	G	H	I
5	ρ_i	ρ_c	$P_i(t)$	$P_c(t)$	Kri
6	0,025	0,2667	0,9753099	0,771052	0,9756098
7	0,0192		0,9841273		0,9811617
8	0,0063		0,9930244		0,9937394
9	0,024		0,9753099		0,9765625
10	0,108		0,9417645		0,9025271
11	0,0078		0,9851119		0,9922604
12	0,0054		0,9910404		0,994629
13	0,02		0,9753099		0,9803922
14	0,048		0,9531338		0,9541985
15	0,003		0,9704455		0,997009
16	0,2667		0,7710516		

$К_{Г1}$=1/(1+0,025)= 0,975609756;

$К_{Г2}$=1/(1+0,0276)= 0,981161695;

$К_{Г3}$=1/(1+0,045)= 0,993739442;

$К_{Г4}$=1/(1+0,05760,9765625;

$К_{Г5}$=1/(1+0,1620,902527076;

$К_{Г6}$=1/(1+0,00624)= 0,992260369;

$К_{Г7}$=1/(1+0,009)= 0,994629003;

$К_{Г8}$=1/(1+0,0128)= 0,980392157;

$К_{Г9}$=1/(1+0,08)= 0,954198473;

$К_{Г10}$=1/(1+0,002)= 0,997008973.

7 Определяем коэффициент готовности системы в целом

$$K_{ГС} = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{n}\rho_i} = \frac{1}{1+\rho_c}; \qquad (1.32)$$

в строке формул вводим «1/(1+F6)».

$К_{ГС}$ = 1/(1+0,2667) = 0,789452909.

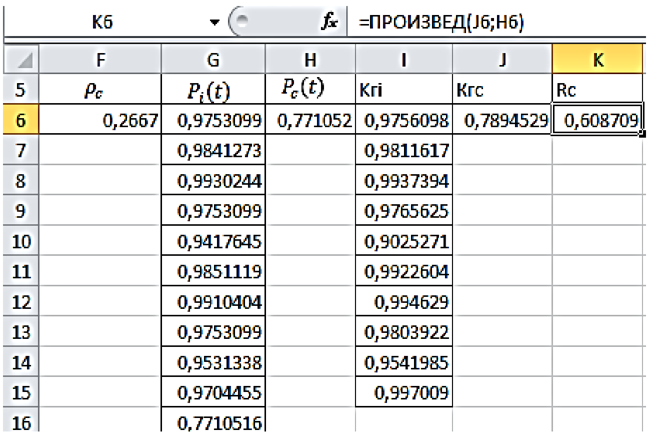
Таблица 3 – Результаты вычислений основных количественных характеристик надежности

Элементы системы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ_i ч$^{-1}$	0,0025	0,0016	0,0007	0,0025	0,006	0,0015	0,0009	0,0025	0,0048	0,003
$t_{вi}$, ч	10	12	9	9,6	18	5,2	6	8	10	1
ρ_i (t)	0,0025	0,0192	0,0063	0,024	0,108	0,0078	0,0054	0,02	0,048	0,003
$P_i(t)$	0,975	0,984	0,993	0,975	0,942	0,985	0,991	0,975	0,953	0,971
$K_{ГС}$	0,710									

8 Коэффициент оперативной готовности системы

$$R_c = K_{ГС} P_c(t)\,; \qquad (1.33)$$

В строке формул вводим «ПРОИЗВЕД(J6;H6)».



K6 | f_x =ПРОИЗВЕД(J6;H6)

	F	G	H	I	J	K
5	ρ_c	$P_i(t)$	$P_c(t)$	Kгi	Kгс	Rc
6	0,2667	0,9753099	0,771052	0,9756098	0,7894529	0,608709
7		0,9841273		0,9811617		
8		0,9930244		0,9937394		
9		0,9753099		0,9765625		
10		0,9417645		0,9025271		
11		0,9851119		0,9922604		
12		0,9910404		0,994629		
13		0,9753099		0,9803922		
14		0,9531338		0,9541985		
15		0,9704455		0,997009		
16		0,7710516				

R_c= 0,771052*0,7894529=0,608709.

Алгоритм определения кратности общего резервирования следующий,

-для постоянно включенного резерва:

$$R_{noc} = (1-(1-P_c(t))^{m+1})(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m+1}\frac{1}{i!\rho_c{}^i}}) \tag{1.34}$$

Для простоты расчета разобьем формулу на 2 части. Чтобы найти значение суммы в знаменателе в строке формул вводим «1/(ФАКТР(A19)*СТЕПЕНЬ(F6;A19))». Значение $R_{\text{пос}}$ находим, вводя в строке формул «(1-СТЕПЕНЬ(1-H6;2))*(1-1/(1+СУММ(B19:B20)))».

При m=1:

$$R_{noc} = (1-(1-0{,}771052)^{1+1})(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{1+1}\frac{1}{i!\,0{,}2667^i}}) = 0{,}86714. \tag{1.35}$$

Так как при m=1 надежность новой системы не удовлетворяет требуемой ($R_c \geq 0.95$), то выбирается следующий наименее надежный элемент, который так же дублируется, и вновь ведется расчет надежности системы уже с двумя резервными элементами.

При m=2:

$$R_{noc} = (1-(1-0{,}771052)^{2+1})(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{2+1}\frac{1}{i!\,0{,}2667^i}}) = 0{,}93996. \tag{1.36}$$

При m=3:

$$R_{noc} = (1-(1-0{,}771052)^{3+1})(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{3+1}\frac{1}{i!\,0{,}2667^i}}) = 0{,}95369. \tag{1.37}$$

C19 =(1-СТЕПЕНЬ(1-H6;3))*(1-1/(1+СУММ(B19:B22)))

	A	B	C	D	E	F	G
17							
18	i1	сумма	Rпос				
19	1	3,749531309	0,95369				
20	2	7,029492517					
21	3	8,785767425					
22	4	8,235627508					

Таким образом, для достижения оптимальных условий надежности исходную систему необходимо резервировать постоянно включенным резервом с кратностью m=3.

- для резерва замещением:

$$R_C = P_c(t)\sum_{i=0}^{m}\frac{(-\ln P_c(t))^i}{i!}\cdot(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m+1}\frac{1}{\rho_c{}^i}}) \qquad (1.38)$$

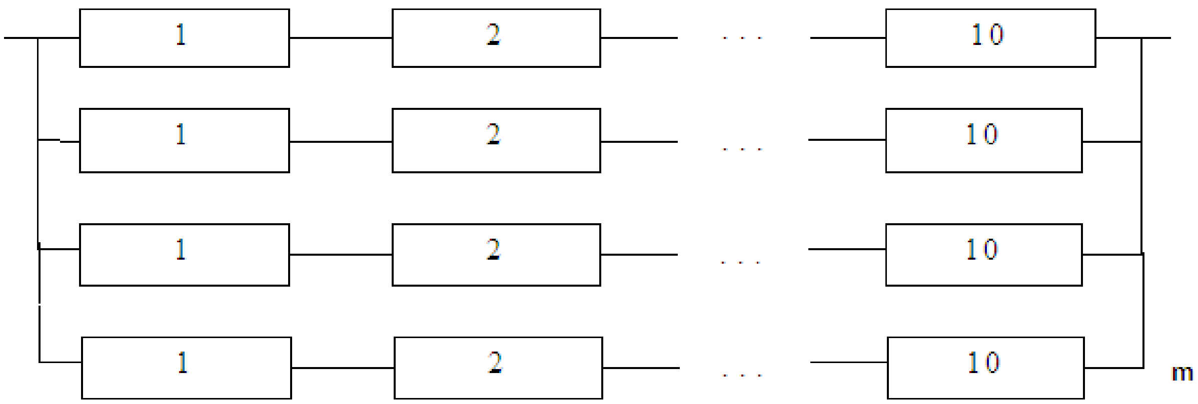


Рисунок 2 – Структура системы общего резервирования, с постоянно включенным резервом, с кратностью m=3

Для простоты расчета также разобьем формулу на 3 части. Чтобы найти значение суммы в числителе в строке формул вводим «СТЕПЕНЬ(-LN(H6);D19)/ФАКТР(D19)». Чтобы найти значение суммы в знаменателе в строке формул вводим 1/СТЕПЕНЬ(F6;D20). Значение R_c находим, вводя в строке формул « H6*СУММ(E19:E21)*(1-1/(1+СУММ(F20:F22)))».

При m=1 получаем значение:

$$R_C = P_c(t)\sum_{i=0}^{1}\frac{(-\ln P_c(t))^i}{i!}\cdot(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{1+1}\frac{1}{\rho_c{}^i}}) = 0{,}9198715, \tag{1.39}$$

что не удовлетворяет требованиям надежности системы $R_c \geq 0.95$.

При m=2:

$$R_C = P_c(t)\sum_{i=0}^{2}\frac{(-\ln P_c(t))^i}{i!}\cdot(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{2+1}\frac{1}{\rho_c{}^i}}) = 0{,}9836388. \tag{1.40}$$

fx =H6*СУММ(E19:E21)*(1-1/(1+СУММ(F20:F22)))

	D	E	F	G
0		0,048		0,9531338
1		0,003		0,9704455
		0,2667		0,7710516
	i2	ln	сумма	Rc
9	0	1		0,9836388
	1	0,26	3,749531309	
	2	0,0338	14,05898503	
	3		52,71460455	

Следовательно, в случае резервирования замещением для обеспечения требуемого уровня надежность системы, крастность резервирования m=2.

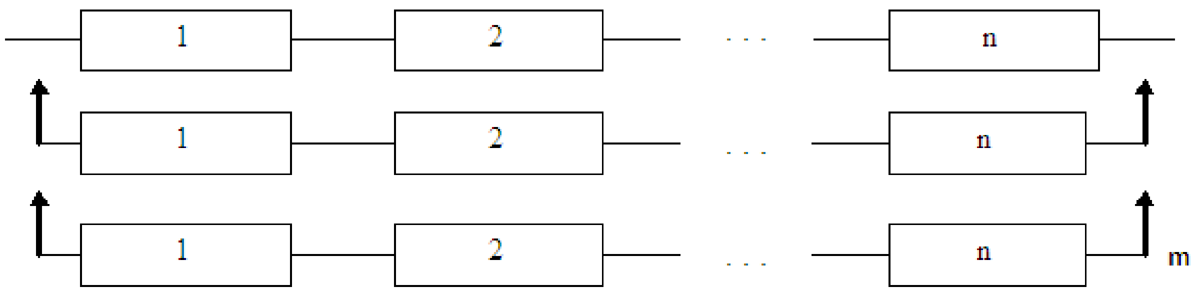


Рисунок 3 – Структура системы в случае резервирования замещением, с кратностью резервирования m=2

В рассматриваемом примере по итогам расчёта в Excel мы можем видеть, что при постоянно включённом резерве для обеспечения требуемого уровня риска потребуется две резервные системы, а в случае резервирования замещением − только одна (при этом необязательно решать трансцендентные уравнения - можно исходить из той очевидной предпосылки, что кратность резервирования может быть только целым числом и, таким образом, определять кратность резервирования методом подбора, подставляя в уравнения целые значения m и оценивая получившуюся величину риска).

При использовании раздельного резервирования, следует попробовать избежать необходимости резервировать каждый элемент системы, лишая некоторые элементы их «дублёров» и анализируя, как это скажется на уровне риска.

Алгоритм определения кратности раздельного резервирования оптимальной системы следующий:

- раздельное постоянное резервирование:

$$V_p = (1-(1-p_1)^{m_1+1}, 1-(1-p_2)^{m_2+1}, ..., 1-(1-p_n)^{m_n+1},$$
$$(1-(1-p_1)^{m_1+1})(1-(1-p_2)^{m_2+1})...(1-(1-p_n)^{m_n+1})), \qquad (1.41)$$

$$V_{Кг}=(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_1+1}\frac{1}{i!\rho_1^{\ i}}},1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_2+1}\frac{1}{i!\rho_2^{\ i}}},\ldots,1-\frac{1}{1+\sum_{n}^{m_n+1}\frac{1}{i!\rho_n^{\ i}}}),$$
$$(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_1+1}\frac{1}{i!\rho_1^{\ i}}})(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_2+1}\frac{1}{i!\rho_2^{\ i}}})\ldots(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_n+1}\frac{1}{i!\rho_n^{\ i}}})). \quad (1.42)$$

Значение коэффициента оперативной готовности определяется как произведение последних элементов векторов $V_р$ и $V_{Кг}$.

При резервировании элементов 1 раз система не удовлетворяла оптимальным требованиям.

Резервируем каждый элемент 2 раза, т.е. m=2. Для расчета Vр в строке формул вводим =1-СТЕПЕНЬ(1-G6;2+1). Чтобы найти значение $V_{Кг}$ разбиваем формулу на 2 части: знаменатель равен: «=1+СУММ(1/(ФАКТР(A$18)*СТЕПЕНЬ(E6;A$18));1/(ФАКТР(A$19)*СТЕПЕНЬ(E6;A$19));1/(ФАКТР(A$20)*СТЕПЕНЬ(E6;A$20)))», для нахождения значения $V_{Кг}$ в строке формул вводим « =1-1/C24». Чтобы найти значение $R_с$ находим Рс новой системы, используя для каждого резерва как для мини-системы формулу $P_c(t)=1-\prod_{i-0}^{m}(1-P_i(t))$, и умножаем на вектор Кгс=($V_р$ $\cdot V_{Кг}$). Методом подбора было установлено, что для достижения оптимальной надежности исходной системы, для постояного раздельного резервирования, крастность резервирования m=2 для элементов 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 , и m=1 элемента 10.

	A	B	C	D	E	F	G	H
18	1	3,749531309	0,96523	0	1		0,98600972	
19	2	7,029492517		1	0,03802794	3,749531309		
20	3	8,785767425		2	0,000723062	14,05898503		
21	4	8,235627508		3		52,71460455		
22	раздельное постоянное							
23		Vр	зн-ль Vкг	Vкг	Кгс	$P_i(t)$	$P_c(t)$	Rc
24	1	0,999984949	11507,67	=I18	0,992809511	0,9993904	0,962686043	0,9557639
25	2	0,999996001	24956,93	0,99996		0,999748058		
26	3	0,999999661	679298,7	0,999999		0,999951342		
27	4	0,999984949	12967,05	0,999923		0,9993904		
28	5	0,999802502	185,4316	0,994607		0,99660863		
29	6	0,9999967	359555,9	0,999997		0,999778346		
30	7	0,999999281	1075776	0,999999		0,999919725		
31	8	0,999984949	22134,33	0,999955		0,9993904		
32	9	0,999897061	1745,888	0,999427		0,997803558		
33	10	0,9993904	55889,89	0,999982		0,970445534		
34		0,999036705		0,993767		0,962686043		

Получаем, что для новой системы Pc=0,962686, а значение коэффициента оперативной готовности Rc=0,9557639.

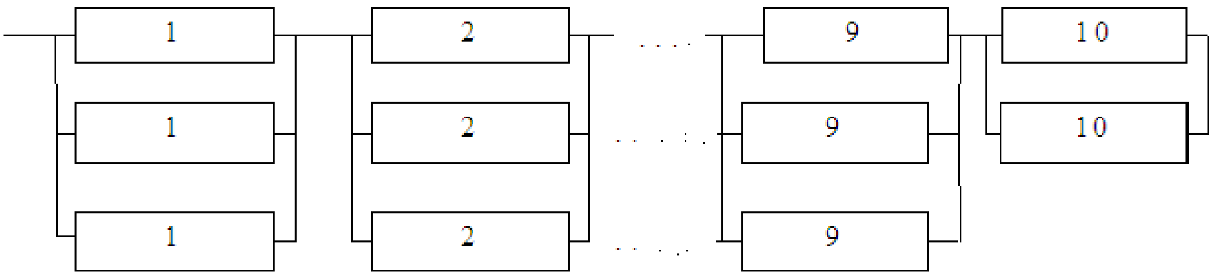


Рисунок 4 – Структура системы в случае раздельного постоянного резервирования, с кратностью резервирования m=2

Алгоритм кратности раздельного резервирования замещением следующий:

$$V_p = (p_1(t)\sum_{i=0}^{m_1}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}, p_2(t)\sum_{i=0}^{m_2}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!},..., p_n(t)\sum_{i=0}^{m_n}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}),$$

$$P_c(t)\sum_{i=0}^{m_1}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}, p_2(t)\sum_{i=0}^{m_2}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!},..., p_n(t)\sum_{i=0}^{m_n}\frac{(-\ln p_i(t))^i}{i!}))$$

(1.43)

$$V_{K_г} = (1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_1+1}\frac{1}{\rho_1{}^i}}, 1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_2+1}\frac{1}{\rho_2{}^i}},...,1-\frac{1}{1+\sum_{n}^{m_n+1}\frac{1}{\rho_n{}^i}}),$$

$$(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_1+1}\frac{1}{\rho_1{}^i}})(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_2+1}\frac{1}{\rho_2{}^i}})...(1-\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{m_n+1}\frac{1}{\rho_n{}^i}})). \qquad (1.44)$$

Дублируем каждый основной элемент – резервным (резервируем каждый элемент 1 раз), m=1. Для расчета Vp формулу разбиваем на 2 части: для нахождения суммы в строке формул для каждого элемента вводим «=СУММ(СТЕПЕНЬ(-LN(G6);D$18)/ФАКТР(D$19);СТЕПЕНЬ(-LN(G6); D$19)/ФАКТР(D$19))», для значения Vp «=G6*L24». Чтобы найти значение $V_{Кг}$ разбиваем формулу на 2 части: знаменатель равен: «=1+СУММ(1/СТЕПЕНЬ(E6;D$19);1/СТЕПЕНЬ(E6;D$20))», для нахождения значения $V_{Кг}$ в строке формул вводим «=1-1/N24». Значение R_c находим аналогично, как и при раздельном постоянном резервировании системы.

22		раздельное замещением							
23		ln	Vp	зн-ль Vкг	Vкг	Кгс	$P_i(t)$	$P_c(t)$	Rc
24		1,025	0,999693	1641	=S24	0,980939	0,9993904	0,9911377	0,972246
25		1,016	0,999873	2765,757	0,999638		0,999748058		
26		1,007	0,999976	25354,99	0,999961		0,999951342		
27		1,025	0,999693	1778,778	0,999438		0,9993904		
28		1,06	0,99827	95,99314	0,989583		0,99660863		
29		1,015	0,999889	16565,76	0,99994		0,999778346		
30		1,009	0,99996	34479,74	0,999971		0,999919725		
31		1,025	0,999693	2551	0,999608		0,9993904		
32		1,048	0,998884	455,8611	0,997806		0,997803558		
33		1,03	0,999559	111445,4	0,999991		0,999126534		
34			0,995497		0,985376		0,991137715		

Получили, Pc=0,9911377, Rc=0,972246.

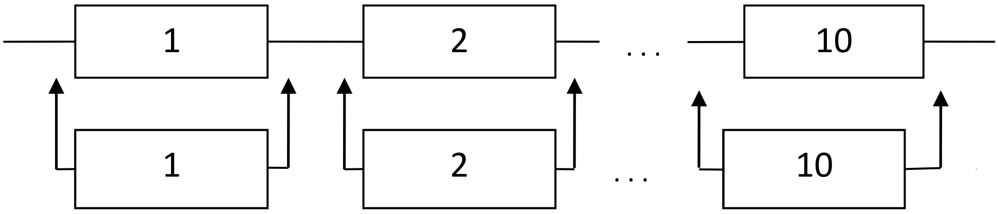


Рисунок 5 – Структура системы в случае раздельного резервирования замещением m=1

Таким образом, из результатов расчёта можно сделать вывод о том, что при постоянном раздельном резервировании можно, сохраняя заданный уровень надёжности, не резервировать десятый элемент системы, а в случае раздельного резервирования замещением – резервируем все элементы 1 раз.

2 Тема «Проектирование технической системы по заданным показателям надежности и риска»

2.1 Постановка задачи

Исходными данными для расчетов являются:

- структурная схема системы в виде последовательного (основного) соединения элементов, как показано на рисунке 7;

- n - число элементов системы;

- T_i- среднее время безотказной работы i-го элемента, i = 1, 2, … , n;

- r_i- риск из-за отказа i–го элемента, i = 1, 2, … , n;

- T - время непрерывной работы системы;

- m – коэффициент уменьшения риска в результате повышения надежности системы;

- T_{Bi} - среднее время ремонта i - го элемента, i = 1, 2, … , n;

- приоритет обслуживания отказавших элементов, который может быть прямым, обратным и назначенным (с заданным порядком номеров ремонтируемых элементов). Требуется разобрать структурную схему технической системы, отказ которой приводил бы к риску, не более заданного.

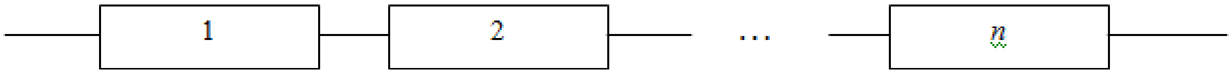


Рисунок 6 - Структурная схема системы

В результате расчетов необходимо:

- определить показатели надежности исходной системы и суммарный риск из-за ее отказа;

- разработать структурную схему системы, риск которой в mраз меньше исходной, применяя структурную избыточность с постоянно включенным резервом;

- определить показатели надежности и суммарный риск новой системы;

- определить показатели надежности и суммарный риск новой системы, заменяя постоянно включенный резерв на резерв замещением;

- провести сравнительный анализ рассмотренных методов введения структурной избыточности;

- вычислить вероятность безотказной работы, среднее время безотказной работы и риск из-за отказа ремонтируемой системы, считая восстановление неограниченным;

- оценить влияние восстановления на надежность и риск системы с нагруженным резервом;

- построить граф состояний для полностью ограниченного восстановления и заданного приоритета обслуживания, составить и решить систему дифференциальных уравнений, определить вероятность безотказной работы и техногенный риск системы;

- составить и решить систему алгебраических уравнений, определить наработку на отказ;

- сделать выводы по работе.

Для выполнения курсовой работы, студент выбирает вариант, согласно, последней цифры в зачетной книжке. Исходные значения для курсовой работы приведены таблице Б.1.

2.2 Методика решения

2.2.1 Показатели надежности и риск нерезервированной системы

Основными показателями надежности, характеризующими случайное время до первого отказа неремонтируемой или ремонтируемой системы, являются:

- вероятность безотказной работы $P(t)$ в течение заданного времени t;

- среднее время безотказной работы T_1.

Вероятность безотказной работы представляет собой закон распределения времени до первого отказа, а среднее время безотказной работы – среднее время функционирования системы до первого отказа.

Обозначим через

$$\lambda_i = \frac{1}{T_i}, \qquad (2.1)$$

где $\lambda_i -$ интенсивность отказов i – го элемента системы. Если после наступления отказа i-й элемент может ремонтироваться, то через

$$\mu_i = \frac{1}{T_{Bi}}, \qquad (2.2)$$

где μ_i - обозначим его интенсивность восстановления, $i = 1, 2, \dots, n$.

Для нерезервированной системы, состоящей из n элементов, вероятность безотказной работы и среднее время безотказной работы определяются по формулам:

$$\mathrm{P(t) = e^{-\Lambda t}}, \tag{2.3}$$

$$\mathrm{T_1} = \frac{1}{\Lambda}, \tag{2.4}$$

где Λ– интенсивность отказа системы.

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i, \tag{2.5}$$

Суммарный риск системы за время t вследствие отказа какого-либо элемента определяется по формуле:

$$R(t) = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot p_i(t), \tag{2.6}$$

где $p_i(t)$–вероятность отказа i – го элемента системы в момент времени t.

$$p_i(t) = \frac{\lambda_i}{\Lambda} \cdot \left(1 - e^{-\Lambda t}\right). \tag{2.7}$$

Формулы (2.3) и (2.6) даже для нерезервированной системы справедливы только в случае, когда время до отказа каждого элемента случайно и имеет экспоненциальное распределение вероятностей. В общем случае эти формулы являются приближенными.

2.2.2 Вероятность безотказной работы резервированных подсистем

2.2.2.1 Неремонтируемая резервированная система

Предположим, что некоторый элемент зарезервирован m - 1 раз однотипными по надежности элементами с интенсивностью отказа λ.

Тогда при постоянно включенном резерве вероятность безотказной работы $P(t)$ и среднее время безотказной работы системы T_1 выражаются формулами:

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^m, \qquad (2.8)$$

$$T_1 = \frac{1}{\lambda}\sum_{k=1}^{m} \frac{(-1)^{k-1} C_m^k}{k}, \qquad (2.9)$$

В случае резерва замещения формулы вероятности $P(t)$ и среднего времени безотказной работы системы T_1 имеют вид:

$$P(t) = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\lambda^k t^k}{k!} \cdot e^{-\lambda t}, \qquad (2.10)$$

$$T_1 = \frac{m}{\lambda}. \qquad (2.11)$$

2.2.2.2 Ремонтируемая резервированная система

Определение вероятности безотказной работы ремонтируемой системы является более сложной задачей, и мы ограничимся здесь случаем только дублированной системы.

Пусть λ - интенсивность отказа, μμ - интенсивность восстановления каждого элемента дублированной системы. Тогда вероятность безотказной работы системы для постоянно включенного резерва выражается равенством:

$$P(t) = \frac{z_1 + \mu + 3 \cdot \lambda}{z_1 - z_2} \cdot e^{z_1 t} - \frac{z_2 + \mu + 3 \cdot \lambda}{z_1 - z_2} \cdot e^{z_2 t}, \qquad (2.12)$$

где

$$z_{1,2} = \frac{-(\mu + 3\cdot\lambda) \pm \sqrt{(\mu + 3\cdot\lambda)^2 - 8\cdot\lambda^2}}{2}, \qquad (2.13)$$

а средняя наработка до отказа равна:

$$T_1 = \frac{\mu + 3\cdot\lambda}{2\cdot\lambda^2}. \qquad (2.14)$$

Для резерва замещением вероятность безотказной работы системы выражается равенством:

$$P(t) = \frac{z_1 + \mu + 2\cdot\lambda}{z_1 - z_2}\cdot e^{z_1 t} - \frac{z_2 + \mu + 2\cdot\lambda}{z_1 - z_2}\cdot e^{z_2 t}, \qquad (2.15)$$

где

$$z_{1,2} = \frac{-(\mu + 2\cdot\lambda) \pm \sqrt{(\mu + 2\cdot\lambda)^2 - 4\cdot\lambda^2}}{2}, \qquad (2.16)$$

а среднее время безотказной работы равно:

$$T_1 = \frac{\mu + 2\cdot\lambda}{\lambda^2}. \qquad (2.17)$$

Оценим выигрыш от восстановления G_{T_1} дублированной системы по среднему времени безотказной работы.

Так как, среднее время безотказной работы дублированной системы

$$T_1 = 1{,}5\cdot\frac{1}{\lambda}, \qquad (2.18)$$

для случая постоянно включенного резерва и

$$T_1 = 2\cdot\frac{1}{\lambda}, \qquad (2.19)$$

для случая замещения, то этот выигрыш соответственно равен

$$G_{T_1} = \frac{\mu}{3\lambda} + 1\,, \qquad (2.20)$$

и

$$G_{T_1} = \frac{\mu}{2\lambda} + 1. \qquad (2.21)$$

2.2.3 Надежность и риск резервированной системы, состоящей из независимых подсистем

Рассмотрим метод определения показателей надежности и риска резервированной системы. Предложим, что -й элемент зарезервирован $m_i - 1$ раз однотипными по надежности элементами, i = 1, 2, … , n, причем вид резервирования произвольный (нагруженный, ненагруженный, облегченный). На рисунке 8 показан случай раздельного резервирования с постоянно включенным резервом.

Система может быть неремонтируемой или ремонтируемой, но при этом отдельные ее подсистемы должны быть независимы по обслуживанию. Последнее означает, что имеет место неограниченное восстановление, т.е. каждая подсистема имеет такое число ремонтных органов, чтобы не возникала очередь на восстановление отказавших элементов.

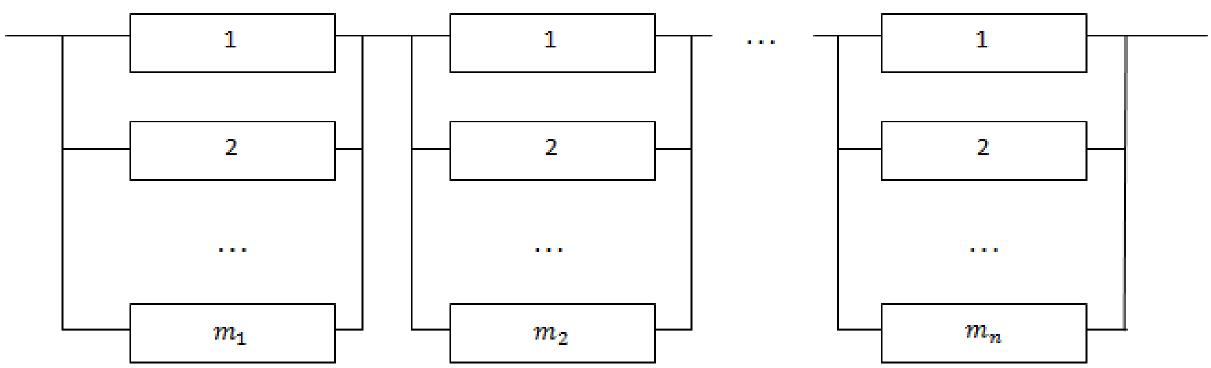


Рисунок 7 - Структурная схема системы с раздельным резервированием

Обозначим через $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы, а через $Q_i(t)$ - вероятность отказа -й подсистемы, $i = 1, 2\ldots, n$.

$$Q_i(t) = 1 - P_i(t). \quad (2.22)$$

Тогда вероятность безотказной работы и средняя наработка до отказа всей системы соответственно равны:

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t), \quad (2.23)$$

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (2.24)$$

Риск из-за отказа системы определяется по формуле:

$$R(t) = \sum_{i=1}^{n} r_i \int_0^t P_1(x) \ldots Q_i'(x) \ldots P_n(x)dx. \quad (2.25)$$

2.2.4 Надежность и риск резервированной системы, состоящей из зависимых по восстановлению подсистем

Для систем, образованных из зависимых по восстановлению подсистем, не существует простых соотношений типа (2.23) и (2.25) для расчета ее показателей надежности и риска. Здесь необходимо учитывать дисциплину обслуживания отказавших элементов, а именно: количество ремонтных органов и приоритет обслуживания, т.е. порядок, в котором ремонтируются отказавшие элементы.

Описание функционирования системы осуществляется с помощью построения графа состояний и составления системы линейных алгебраических и дифференциальных уравнений.

Граф состояния системы строится в следующей порядке:

- намечается в виде горизонтальных линий уровни графа, которые нумеруются сверху вниз, считая верхний уровень нулевым;

- возможным состоянием системы ставится в соответствии узлы графа, располагаемые на определенных уровнях в виде точек (или кружков, или квадратов). На нулевом уровне помещается узел, соответствующий состоянию, когда все элементы системы исправны (состояние (0)); на первом уровне помещаются узлы, соответствующие состояниям, когда отказал один любой элемент системы; на втором уровне помещаются узлы, соответствующие состояниям, когда отказали любые два элемента системы и т.д.; на последнем уровне располагаются узлы, соответствующие только отказовым состояниям системы;

- узлы графа соединяются ветвями, которые соответствуют переходам системы из состояния в состояние. Ветви размечаются интенсивностями отказов (восстановлений) элементов, из-за которых осуществляются переходы из состояния в состояние;

- узлы графа, соответствующие отказовым состояниям системы,

Узлы графа, соответствующим одинаковым по надежности элементам, входящим в одну резервную группу, могут объединяться, и соответствующая интенсивность перехода в укрупненный узел умножается на число элементов резервной группы. Общее число узлов графа при этом существенно сокращается.

Разработаем математическую модель функционирования системы, для чего получим, пользуясь графом состояний, выражение для показателя надежности и риска системы.

Пусть E – множество всех состояний системы; E_+ - множество исправных; E_- - множество отказовых состояний; $p_i(t)$ – вероятность пребывания системы в момент времени t в состоянии i, $i \in E$; $\lambda_{i,j}$ – интенсивность перехода из состояния i в состояние j. Если переход из состояния i в состояние j отсутствует, то $\lambda_{i,j} = 0$.

По графу состояний формально составляется система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, описывающая процесс функционирования нерезервированной и резервированной технической системы:

$$p_i'(t) = -\sum_{j \in E} \lambda_{i,j} \cdot p_i(t) + \sum_{j \in E} \lambda_{j,i} \cdot p_j(t), \quad i \in E. \tag{2.26}$$

Предполагая, что в момент времени t=0 система полностью исправна, запишем начальные условия функционирования:

$$p_0(0) = 1, \tag{2.27}$$

$$p_i(0) = 0, \tag{2.28}$$

$$i \in E \setminus \{0\} \tag{2.29}$$

Решение системы (2.26) с заданными начальными условиями позволяет найти вероятность безотказной работы технической системы за время t при условии, что все состояния отказа являются поглощающими:

$$p(t) = \sum_{i \in E+} p_i(t). \tag{2.30}$$

Для определения среднего времени безотказной работы по графу состояний составляется система линейных алгебраических уравнений относительно средних времен пребывания технической системы в исправных состояниях τ_i:

$$-\sum_{j \in E} \lambda_{i,j} \cdot \tau_i + \sum_{j \in E} \lambda_{j,i} \cdot \tau_j = -p_i(0), i \in E_+. \tag{2.31}$$

Тогда средняя наработка до отказа находится суммированием среднего времени пребывания системы в исправных состояниях:

$$T_1 = \sum_{j \in E} \tau_i. \tag{2.32}$$

Суммарный риск системы за время t находится по формуле:

$$R(t) = \sum_{i \in E\_} r_{k(i)} \cdot p_i(t), \tag{2.33}$$

где $r_{k(i)}$ – риск системы из-за отказа i-го элемента.

2.3 Пример решения

Рассмотрим один вариант выполнения курсовой работы со следующими исходными данными: n = 4, коэффициент уменьшения риска в результате повышения надежности системы m = 120, время непрерывной работы t = 1 год, восстановление полностью ограниченное, приоритет обслуживания назначенный: первым ремонтируется элемент с большим риском. Остальные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Исходные данные курсовой работы

Характеристики элементов	№ элемента			
	1	2	3	4
Т, лет	4	16	4	14
$T_{вi}$, ч	80	100	100	100
r, усл.ед.	40	100000	40	1000

2.3.1 Определение показателей надежности исходной системы и суммарного риска из-за ее отказа

Находим интенсивности отказов элементов:

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{4} = 0{,}25 \text{ лет}^{-1}, \tag{2.34}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{16} = 0{,}0625 \text{ лет}^{-1}, \tag{2.35}$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{4} = 0{,}25 \text{ лет}^{-1}, \tag{2.36}$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{T_4} = \frac{1}{14} = 0{,}07 \text{ лет}^{-1}. \tag{2.37}$$

Вычисление производим в системе Mathcad:

$$T1 := 4 \qquad L1 := \frac{1}{T1} \qquad L1 = 0.25$$
$$T2 := 16 \qquad L2 := \frac{1}{T2} \qquad L2 = 0.063$$
$$T3 := 4 \qquad L3 := \frac{1}{T3} \qquad L3 = 0.25$$
$$T4 := 14 \qquad L4 := \frac{1}{T4} \qquad L4 = 0.071$$

Находим суммарную интенсивность отказов системы:

$$\Lambda\Lambda = \lambda\lambda_1 + \lambda\lambda_2 + \lambda\lambda_3 + \lambda\lambda_4 = 0{,}6339 \text{ лет}^{-1\cdot} \tag{2.38}$$

Вычисление производим в системе Mathcad:

$$L := L1 + L2 + L3 + L4$$
$$L = 0.634$$

Найдем вероятность и среднее время безотказной работы системы за время t = 1 год, по формуле:

$$P(1) = e^{-\Lambda\cdot t} = e^{-0{,}6339\cdot 1} = 0{,}53051, \qquad (2.39)$$

$$T_1 = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{0{,}6339} = 1{,}5775 \text{ год} . \qquad (2.40)$$

Суммарный риск системы определяется по формуле

$$R(t) = \sum_{i=1}^{4} r_i \cdot\cdot\ \lambda\lambda_i \cdot \frac{1-e^{-\Lambda\Lambda\cdot t}}{\Lambda\Lambda}. \qquad (2.41)$$

На основании этой формулы риск системы в момент времени $t = 1$ год будет иметь значение:

$$R(t) = (r_1.\lambda_1 + r_2.\lambda_2 + r_3.\lambda_3 + r_4.\lambda_4) \cdot \frac{1-e^{-\Lambda\cdot\Lambda\cdot t}}{\Lambda\Lambda}, \qquad (2.42)$$

$$R(1) = (40 \cdot 0{,}25 + 100000 \cdot 0{,}0625 + 40 \cdot\ 0{,}25 + 10000{,}07)\,\frac{1-0{,}53051}{0{,}6339} = 4697\,. \qquad (2.43)$$

Вычисление производим в системе Mathcad:

```
r1 := 40        t := 1
r2 := 100000
r3 := 40
r4 := 1000
```

$$R(t) := (r1\cdot L1 + r2\cdot L2 + r3\cdot L3 + r4\cdot L4)\cdot\frac{1-e^{-L\cdot t}}{L}$$

$$R(t) = 4.697 \times 10^{3}$$

2.3.2 Разработка структурной схемы системы, риск которой в m раз меньше риска исходной

Второй элемент, отказ которого ведет к отказу системы, имеет наибольший риск. Зарезервируем его идентичным по надежности элементом. Для решения воспользуемся системой Mathcad. Тогда вероятность безотказной работы каждой группы элементов равна:

$$P_1(\mathrm{t}) = \mathrm{e}^{-\lambda_1 \cdot \mathrm{t}}, P_2(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_2 \cdot \mathrm{t}})^2, P_3(t) = e^{-\lambda_3 \cdot t}, P_4(t) = e^{-\lambda_4 \cdot t}. \quad (2.44)$$

$$P_1(t) = 0{,}7788, \quad (2.45)$$

$$P_2(t) = 0{,}9963, \quad (2.46)$$

$$P_3(t) = 0{,}7788, \quad (2.47)$$

$$P_4(t) = 0{,}9323. \quad (2.48)$$

Вычисление производим в системе Mathcad:

$L1 := 0.25$
$L2 := 0.0625$
$L3 := 0.25$
$L4 := 0.07$

$P1 := e^{-L1 \cdot t} = 0.779$

$P2 := 1 - \left(1 - e^{-L2 \cdot t}\right)^2 = 0.996$

$P3 := e^{-L3 \cdot t} = 0.779$

$P4 := e^{-L4 \cdot t} = 0.932$

Находим риск за время t = 1 год по формуле (2.25):

$$R(t) = r_1 \cdot \int_0^1 Q_1'(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_4(t)dt \; + \; r_2 \cdot \int_0^1 P_1(t) \cdot Q_2'(t) \cdot P_3(t) \cdot P_4(t)dt \; + \; r_3 \cdot \int_0^1 P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot Q_3'(t) \cdot P_4(t)dt \; + \; r_3 \cdot \int_0^1 P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot Q_4'(t)dt \qquad (2.49)$$

$$R(t) = \sum_{i=1}^{n} r_i \int_0^t P_1(x) \dots Q_i'(x) \dots P_n(x)dx. \qquad (2.50)$$

В результате расчетов с помощью системы Mathcad получим:

$$R(1) = 40 \cdot 0{,}2 + 100000 \cdot 2{,}54 \cdot 10^{-3} + 40 \cdot 0{,}2 + 1000 \cdot 0{,}05 = 201{,}1. \; (2.51)$$

$$R1 := \int_0^1 \frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L1\cdot t}\right)\cdot\left[1 - \left(1 - e^{-L2\cdot t}\right)^2\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot e^{-L4\cdot t}\,dt = 0.19$$

$$R2 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[\frac{d}{dt}\left[1 - \left[1 - \left(1 - e^{-L2\cdot t}\right)^2\right]\right]\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot e^{-L4\cdot t}\,dt = 2.541 \times 10^{-3}$$

$$R3 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[1 - \left(1 - e^{-L2\cdot t}\right)^2\right]\cdot\left[\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L3\cdot t}\right)\right]\cdot e^{-L4\cdot t}\,dt = 0.19$$

$$R4 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[1 - \left(1 - e^{-L2\cdot t}\right)^2\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot\left[\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L4\cdot t}\right)\right]dt = 0.053$$

Видим, что суммарный риск системы уменьшился более чем в 20 раз, однако он еще не достиг требуемого уровня. Резервируем повторно второй элемент. Вероятность безотказной работы каждой группы элементов будет равна:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 \cdot t}, P_2(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_2 \cdot t})^3, P_3(t) = e^{-\lambda_3 \cdot t}, P_4(t) = e^{-\lambda_4 \cdot t}. \quad (2.52)$$

Вычисление производим в системе Mathcad:

$$P1 := e^{-L1\cdot t} = 0.779$$

$$P2 := 1 - \left(1 - e^{-L2\cdot t}\right)^3 = 1$$

$$P3 := e^{-L3\cdot t} = 0.779$$

$$P4 := e^{-L4\cdot t} = 0.932$$

$$R1 := \int_0^1 \frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L1\cdot t}\right)\cdot\left[1 - \left(1 - e^{-L2\cdot t}\right)^3\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot e^{-L4\cdot t}\,dt = 0.191$$

$$R2 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[\frac{d}{dt}\left[1 - \left[1 - \left(1 - e^{-L2\cdot t}\right)^3\right]\right]\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot e^{-L4\cdot t}\,dt = 1.464\times 10^{-4}$$

$$R3 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[1 - \left(1 - e^{-L2\cdot t}\right)^3\right]\cdot\left[\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L3\cdot t}\right)\right]\cdot e^{-L4\cdot t}\,dt = 0.191$$

$$R4 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[1 - \left(1 - e^{-L2\cdot t}\right)^3\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot\left[\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L4\cdot t}\right)\right]dt = 0.053$$

Используя снова формулу (2.25) и систему Mathcad, получим следующий суммарный риск системы за время $t = 1$ год:

$$R(1) = 40{\cdot}0{,}19 + 100000\cdot 1{,}46\cdot 10^{-4} + 40\cdot 0{,}19 + 1000\cdot 0{,}05 = 82{,}9 \quad (2.53)$$

$$R := 40\cdot 0.191 + 10^{5}\cdot 1.464\cdot 10^{-4} + 40\cdot 0.191 + 10^{3}\cdot 0.053 = 82.92$$

Риск из-за отказа системы снова не достиг требуемого значения. Зарезервируем теперь четвертый элемент, отказ которого вызывает наибольшую опасность в отказе системы. Вероятность безотказной работы каждой группы элементов равна:

$$P_1(\mathrm{t}) = \mathrm{e}^{-\lambda_1\cdot \mathrm{t}}, \quad (2.54)$$

$$P_2(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_2\cdot \mathrm{t}})^3, \quad (2.55)$$

$$P_3(t) = e^{-\lambda_3\cdot t}, \quad (2.56)$$

$$P_4(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_4 \cdot t})^2. \quad (2.57)$$

Вычисление производим в системе Mathcad:

$$P1 := e^{-L1 \cdot t} = 0.779$$

$$P2 := 1 - \left(1 - e^{-L2 \cdot t}\right)^3 = 1$$

$$P3 := e^{-L3 \cdot t} = 0.779$$

$$P4 := 1 - \left(1 - e^{-L4 \cdot t}\right)^2 = 0.995$$

$$R1 := \int_0^1 \frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L1 \cdot t}\right) \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-L2 \cdot t}\right)^3\right] \cdot e^{-L3 \cdot t} \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-L4 \cdot t}\right)^2\right] dt = 0.196$$

$$R2 := \int_0^1 e^{-L1 \cdot t} \cdot \left[\frac{d}{dt}\left[1 - \left[1 - \left(1 - e^{-L2 \cdot t}\right)^3\right]\right]\right] \cdot e^{-L3 \cdot t} \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-L4 \cdot t}\right)^2\right] dt = 1.536 \times 10^{-4}$$

$$R3 := \int_0^1 e^{-L1 \cdot t} \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-L2 \cdot t}\right)^3\right] \cdot \left[\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L3 \cdot t}\right)\right] \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-L4 \cdot t}\right)^2\right] dt = 0.196$$

$$R4 := \int_0^1 e^{-L1 \cdot t} \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-L2 \cdot t}\right)^3\right] \cdot e^{-L3 \cdot t} \cdot \left[\frac{d}{dt}\left[1 - \left[1 - \left(1 - e^{-L4 \cdot t}\right)^2\right]\right]\right] dt = 3.308 \times 10^{-3}$$

В третий раз используя формулу (2.25) и систему Mathcad, получим следующий суммарный риск системы за время $t = 1$ год:

$$R(1) = 40 \cdot 0{,}19 + 100000 \cdot 1{,}54 \cdot 10^{-4} + 40 \cdot 0{,}196 + 1000 \cdot 3{,}31 \cdot 10^{-3} = 34{,}35 \quad (2.58)$$

$$R := 40 \cdot 0.196 + 100000 \cdot 0.0001536 + 40 \cdot 0.196 + 1000 \cdot 0.003308 = 34.348$$

Риск из-за отказа системы достиг требуемого значения, поскольку

$$34{,}348 < \frac{4695}{120} = 39{,}125. \quad (2.59)$$

Итак, структурная схема системы имеет вид, представленный на рисунке 9:

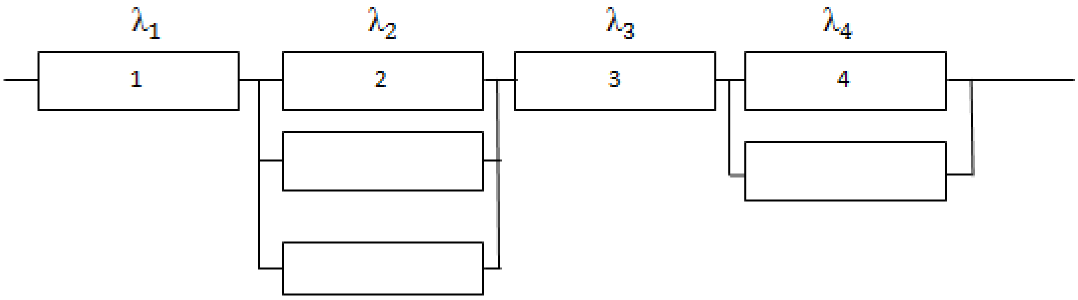


Рисунок 8 - Оптимальная структурная схема системы

2.3.3 Расчет показателей надежности усовершенствованной системы

Произведем расчет показателей надежности спроектированной системы. Вероятность безотказной работы можно найти по формуле (2.23):

$$P(t) = e^{-\lambda\lambda_1 \cdot t} \cdot \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda\lambda_2 \cdot t}\right)^3\right) \cdot e^{-\lambda\lambda_3 \cdot t} \cdot \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda\lambda_4 \cdot t}\right)^2\right), \quad (2.60)$$

Используя систему Mathcad получим

$$P := e^{-L1 \cdot t} \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-L2 \cdot t}\right)^3\right] \cdot e^{-L3 \cdot t} \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-L4 \cdot t}\right)^2\right] = 0.604$$

или после упрощения получим:

$$P(t) = e^{-\Lambda \cdot t} \cdot \left(3 - 3e^{-\lambda_2 \lambda \cdot t} + e^{-2 \cdot \lambda\lambda_2 \cdot t}\right) \cdot \left(2 - e^{-\lambda\lambda_4 \cdot t}\right), \quad (2.61)$$

Используя систему Mathcad получим

$$k := L1 + L2 + L3 + L4 = 0.633$$

$$P := e^{-k \cdot t} \cdot \left(3 - 3 \cdot e^{-L2 \cdot t} + e^{-2 \cdot L2 \cdot t}\right) \cdot \left(2 - e^{-L4 \cdot t}\right) = 0.604$$

Вычисляя значения $P(t)$ от 0 до 1 с шагом 0.1, получим график вероятности безотказной работы изображен на рисунке 9.

Таблица 5 - Значения функции $P(t)$

t, лет	P(t)
0,000	1,000
0,100	0,951
0,200	0,905
0,300	0,860
0,400	0,818
0,500	0,778
0,600	0,74
0,700	0,703
0,800	0,668
0,900	0,635
1,000	0,604

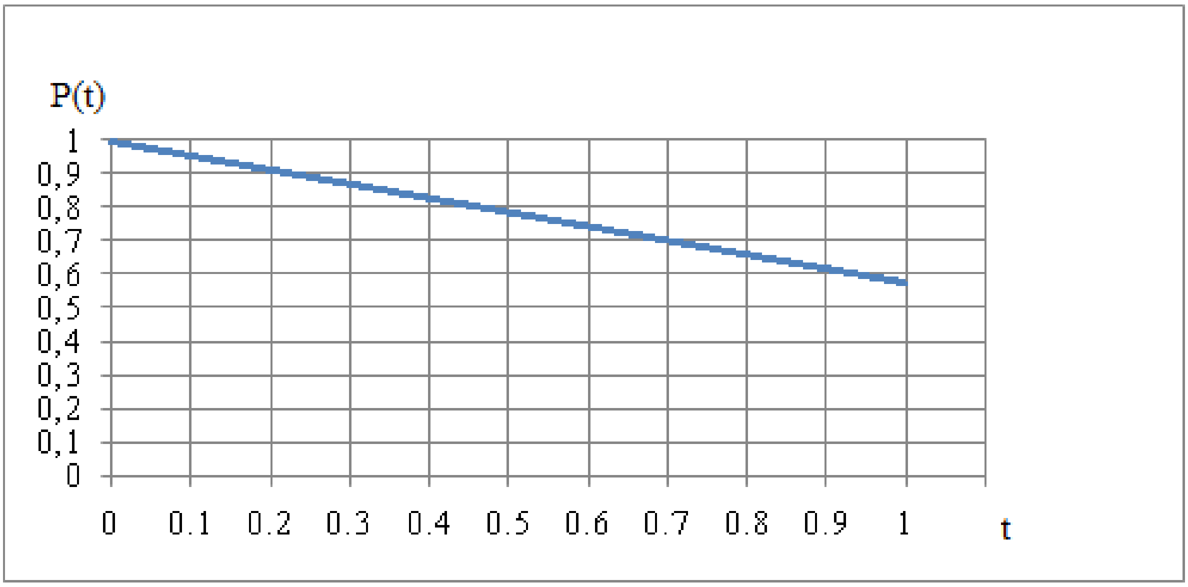


Рисунок 9 - Вероятность безотказной работы усовершенствованной системы, $P(t)$

Рассчитаем наработку на отказ:

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\Lambda t}(3 - 3e^{-\lambda\lambda_2 t} + e^{-2\lambda\lambda_2 t})(2 - e^{-\lambda\lambda_4 t})dt, \qquad (2.62)$$

откуда получим:

$$T_1 = \frac{6}{\Lambda} - \frac{6}{\Lambda+\lambda\lambda_2} + \frac{2}{\Lambda+2\lambda\lambda_2} - \frac{3}{\Lambda+\lambda\lambda_4} + \frac{3}{\Lambda+\lambda\lambda_2+\lambda\lambda_4} - \frac{1}{\Lambda+2\lambda\lambda_2+\lambda\lambda_4} = 1{,}94 \text{ год.} \quad (2.63)$$

Используя систему Mathcad получим

$$T1 := \int_0^{\infty} e^{-k\cdot t}\cdot\left(3 - 3\cdot e^{-L2\cdot t} + e^{-2\cdot L2\cdot t}\right)\cdot\left(2 - e^{-L4\cdot t}\right) dt = 1.936$$

$$T1 := \frac{6}{k} - \frac{6}{k+L2} + \frac{2}{k+2\cdot L2} - \frac{3}{k+L4} + \frac{3}{k+L2+L4} - \frac{1}{k+2\cdot L2+L4} = 1.936$$

2.3.4 Расчет показателей надежности новой системы для резерва замещением

Вероятности безотказной работы вычисляются по формулам:

$$P_1(\mathrm{t}) = \mathrm{e}^{-\lambda_1 \mathrm{t}}, \qquad (2.64)$$

$$P_2(\mathrm{t}) = \left(1 + \lambda_2 \cdot \mathrm{t} + \frac{\lambda_2^2 \mathrm{t}^2}{2}\right) \mathrm{e}^{-\lambda_2 \mathrm{t}}, \qquad (2.65)$$

$$P_3(\mathrm{t}) = \mathrm{e}^{-\lambda_3 \mathrm{t}}, \qquad (2.66)$$

$$P_4(\mathrm{t}) = (1 + \lambda_4 \mathrm{t})\mathrm{e}^{-\lambda_4 \mathrm{t}}. \qquad (2.67)$$

Используя систему Mathcad получим

$$P1 := e^{-L1 \cdot t} = 0.779$$

$$P2 := \left(1 + L2 \cdot t + \frac{L2^2 \cdot t^2}{2}\right) \cdot e^{-L2 \cdot t} = 1$$

$$P3 := e^{-L3 \cdot t} = 0.779$$

$$P4 := (1 + L4 \cdot t) \cdot e^{-L4 \cdot t} = 0.998$$

Вероятность и среднее время безотказной работы, а также риск системы определяются по формулам (2.23) - (2.25).

Сравнительный анализ методов введения структурной избыточности следует провести самостоятельно. Надо численно показать и объяснить повышение надежности системы и уменьшение её риска в случае использования резерва замещением.

2.3.5 Вычисление показателей надежности и риска системы при наличии восстановления

Предположим, что количество ремонтных органов достаточно для того, чтобы подсистемы были независимы по восстановлению (неограниченное восстановление). В этом случае можно воспользоваться формулами (2.23) - (2.25). Поскольку восстановление элементов значительно повышает надежность системы и снижает риск из-за отказа элементов, то в каждой резервной группе можно ставить лишь по одному резервному элементу. Таким образом, для ремонтируемой системы её структурная схема имеет вид, показанный на рисунок 10.

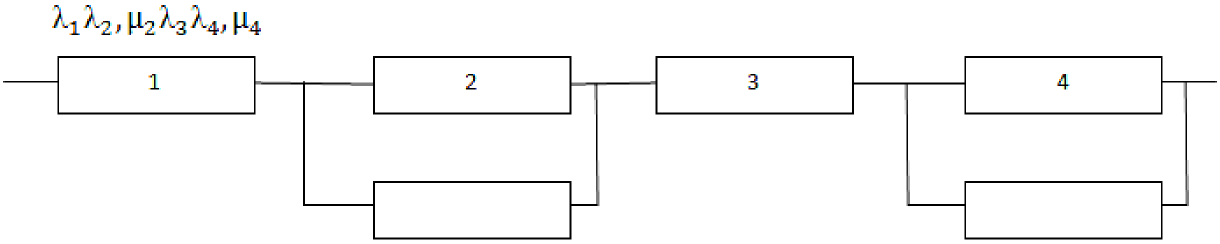


Рисунок 10 - Структурная схема восстанавливаемой системы

2.3.5.1 Постоянно включенный резерв

Поскольку первая и третья подсистемы являются нерезервированными, а вторая и четвертая представляют собой дублированные подсистемы, то в соответствии с формулой 2.12 для постоянно включенного резерва получим следующие формулы для вероятности безотказной работы подсистем:

$$P_1(\mathrm{t}) = \mathrm{e}^{-\lambda_1 \mathrm{t}}, \tag{2.68}$$

$$P_2(\mathrm{t}) = x_2 \mathrm{e}^{\alpha_2 \mathrm{t}} + y_2 e^{\beta_2 \mathrm{t}}, \tag{2.69}$$

$$P_3(\mathrm{t}) = \mathrm{e}^{-\lambda_3 \mathrm{t}}, \tag{2.70}$$

$$P_4(\mathrm{t}) = x_4 \mathrm{e}^{\alpha_4 \mathrm{t}} + y_4 e^{\beta_4 \mathrm{t}}, \tag{2.71}$$

Используя систему Mathcad получим

$P1 := e^{-L1 \cdot t} = 0.779$

$P2 := x2 e^{a2 \cdot t} + y2 \cdot e^{b2 \cdot t} = 0.996$

$P3 := e^{-L3 \cdot t} = 0.779$

$P4 := x4 e^{a4 \cdot t} + y4 \cdot e^{b4 \cdot t} = 0.995$

где:

$$\propto_i = \frac{-(\mu_i + 3\lambda_i) + \sqrt{(\mu_i + 3\lambda_i)^2 - 8\lambda_i^2}}{2}, \tag{2.72}$$

$$\beta_i = \frac{-(\mu_i + 3\lambda_i) - \sqrt{(\mu_i + 3\lambda_i)^2 - 8\lambda_i^2}}{2}, \tag{2.73}$$

$$x_i = \frac{\propto_i + \mu_i + 3\lambda_i}{\propto_i - \beta_i}, \tag{2.74}$$

$$y_i = \frac{\beta_i + \mu_i + 3\lambda_i}{\beta_i - \alpha_i}, \tag{2.75}$$

Интенсивность восстановления элементов i-й подсистемы, i = 1, 2, 3,4.

$$\mu_i = \frac{1}{T_{\text{в}i}}, \text{ ч}^{-1} \tag{2.76}$$

Рассчитываем в Mathcad:

$t1 := 80$

$t2 := 100$

$t3 := 100$

$t4 := 100$

$M1 := \frac{1}{t1} = 0.013$

$M2 := \frac{1}{t2} = 0.01$

$M3 := \frac{1}{t3} = 0.01$

$M4 := \frac{1}{t4} = 0.01$

$$a1 := \frac{-(M1 + 3L1) + \sqrt{(M1 + 3L1)^2 - 8L1^2}}{2} = -0.239$$

$$a2 := \frac{-(M2 + 3L2) + \sqrt{(M2 + 3L2)^2 - 8L2^2}}{2} = -0.055$$

$$a3 := \frac{-(M3 + 3L3) + \sqrt{(M3 + 3L3)^2 - 8L3^2}}{2} = -0.241$$

$$a4 := \frac{-(M4 + 3L4) + \sqrt{(M4 + 3L4)^2 - 8L4^2}}{2} = -0.062$$

$$b1 := \frac{-(M1 + 3L1) - \sqrt{(M1 + 3L1)^2 - 8L1^2}}{2} = -0.524$$

$$b2 := \frac{-(M2 + 3L2) - \sqrt{(M2 + 3L2)^2 - 8L2^2}}{2} = -0.143$$

$$b3 := \frac{-(M3 + 3L3) - \sqrt{(M3 + 3L3)^2 - 8L3^2}}{2} = -0.519$$

$$b4 := \frac{-(M4 + 3L4) - \sqrt{(M4 + 3L4)^2 - 8L4^2}}{2} = -0.158$$

$$x1 := \frac{a1 + M1 + 3L1}{a1 - b1} = 1.836$$

$$x2 := \frac{a2 + M2 + 3L2}{a2 - b2} = 1.621$$

$$x3 := \frac{a3 + M3 + 3L3}{a3 - b3} = 1.864$$

$$x4 := \frac{a4 + M4 + 3L4}{a4 - b4} = 1.647$$

$$y1 := \frac{b1 + M1 + 3L1}{b1 - a1} = -0.836$$

$$y2 := \frac{b2 + M2 + 3L2}{b2 - a2} = -0.621$$

$$y3 := \frac{b3 + M3 + 3L3}{b3 - a3} = -0.864$$

$$y4 := \frac{b4 + M4 + 3L4}{b4 - a4} = -0.647$$

Теперь для вычисления показателей надежности системы можно воспользоваться соотношениями (2.23).

В результате получим:

$$P(t) = \mathrm{e}^{-\lambda_1 t}(x_2 \mathrm{e}^{\propto_2 t} + y_2 e^{\beta_2 t})\mathrm{e}^{-\lambda_3 t}(x_4 \mathrm{e}^{\propto_4 t} + y_4 e^{\beta_4 t}), \quad (2.77)$$

$$T_1 = \frac{x_2 x_4}{\alpha_2 + \alpha_4 + \lambda_1 + \lambda_3} + \frac{y_2 x_4}{\beta_2 + \alpha_4 + \lambda_1 + \lambda_3} + \frac{x_2 y_4}{\alpha_2 + \beta_4 + \lambda_1 + \lambda_3} + \frac{y_2 y_4}{\beta_2 + \beta_4 + \lambda_1 + \lambda_3}. \quad (2.78)$$

$$P := e^{-L1\cdot t}\cdot\left(x2 e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t}\right)\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot\left(x4 e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t}\right) = 0.602$$

$$T1 := \frac{x2 x4}{a2 + a4 + L1 + L3} + \frac{y2\cdot x4}{b2 + a4 + L1 + L3} + \frac{x2 y4}{a2 + b4 + L1 + L3} + \frac{y2\cdot y4}{b2 + b4 + L1 + L3} = 1.868$$

Расчеты с помощью системы Mathcad показывают, что

$$P(t) = 0.602,$$

$$T_1 = 1.868 \text{ года}$$

Аналогично, используя (2.33), найдем риск системы в момент времени $t = 1$ год.

$$P1 := e^{-L1\cdot t} = 0.779$$

$$P2 := x2 e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t} = 0.996$$

$$P3 := e^{-L3\cdot t} = 0.779$$

$$P4 := x4 e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t} = 0.995$$

$$t := 1$$

$$R1 := \int_0^1 \left[\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L1\cdot t}\right)\right]\cdot\left[1 - \left[1 - \left(x2 e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t}\right)\right]^2\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot\left(x4 e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t}\right) dt = 0.196$$

$$R2 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[\frac{d}{dt}\left[1 - \left[1 - \left[1 - \left(x2 e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t}\right)\right]^2\right]\right]\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot\left(x4 e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t}\right) dt = 8.995\times 10^{-6}$$

$$R3 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[1 - \left[1 - \left(x2 e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t}\right)\right]^2\right]\cdot\left[\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L3\cdot t}\right)\right]\cdot\left(x4 e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t}\right) dt = 0.196$$

$$R4 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[1-\left[1-\left(x2\, e^{a2\cdot t}+y2\cdot e^{b2\cdot t}\right)\right]^2\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot\left[\frac{d}{dt}\left[1-\left(x4\, e^{a4\cdot t}+y4\cdot e^{b4\cdot t}\right)\right]\right] dt = 3.298\times 10^{-3}$$

$$R(1) = 40 \cdot 0{,}196 + 100000 \cdot 8{,}995 \cdot 10^{-6} + 40 \cdot 0{,}196 + 1000 \cdot 3{,}298 \cdot 10^{-3} = 19{,}877. \qquad (2.79)$$

$$R := 40\cdot 0.196 + 100000\cdot 8.995\cdot 10^{-6} + 40\cdot 0.196 + 1000\cdot 3.298\cdot 10^{-3} = 19.877$$

2.3.5.2 Резерв замещением

В соответствии с формулой (2.15) для резерва замещением получим следующие формулы для вероятности безотказной работы подсистем:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 \cdot t}, \qquad (2.80)$$

$$P_2(t) = x_2 e^{\alpha_2 \cdot t} + y_2 e^{\beta_2 \cdot t}, \qquad (2.81)$$

$$P_3(t) = e^{-\lambda_3 \cdot t}, \qquad (2.82)$$

$$P_4(t) = x_4 e^{\alpha_4 \cdot t} + y_4 e^{\beta_4 \cdot t}, \qquad (2.83)$$

где:

$$\alpha_i = \frac{-(\mu_i + 2\lambda_i) + \sqrt{(\mu_i + 2\lambda_i)^2 - 4\lambda_i^2}}{2}, \qquad (2.84)$$

$$\beta_i = \frac{-(\mu_i + 2\lambda_i) - \sqrt{(\mu_i + 2\lambda_i)^2 - 4\lambda_i^2}}{2}, \qquad (2.85)$$

$$x_i = \frac{\alpha_i + \mu_i + 2\lambda_i}{\alpha_i - \beta_i}, \quad y_i = \frac{\beta_i + \mu_i + 2\lambda_i}{\beta_i - \alpha_i}. \qquad (2.86)$$

Вычисление показателей надежности и риска производится, как и ранее, на основе равенств (2.23) и (2.25). Расчеты выполняем с помощью системы Mathcad:

$$a1 := \frac{-(M1 + 2L1) + \sqrt{(M1 + 2L1)^2 - 4L1^2}}{2} = -0.2$$

$$a2 := \frac{-(M2 + 2L2) + \sqrt{(M2 + 2L2)^2 - 4L2^2}}{2} = -0.042$$

$$a3 := \frac{-(M3 + 2L3) + \sqrt{(M3 + 2L3)^2 - 4L3^2}}{2} = -0.205$$

$$a4 := \frac{-(M4 + 2L4) + \sqrt{(M4 + 2L4)^2 - 4L4^2}}{2} = -0.048$$

$$b1 := \frac{-(M1 + 2L1) - \sqrt{(M1 + 2L1)^2 - 4L1^2}}{2} = -0.312$$

$$b2 := \frac{-(M2 + 2L2) - \sqrt{(M2 + 2L2)^2 - 4L2^2}}{2} = -0.093$$

$$b3 := \frac{-(M3 + 2L3) - \sqrt{(M3 + 2L3)^2 - 4L3^2}}{2} = -0.305$$

$$b4 := \frac{-(M4 + 2L4) - \sqrt{(M4 + 2L4)^2 - 4L4^2}}{2} = -0.102$$

$$x1 := \frac{a1 + M1 + 2L1}{a1 - b1} = 2.778$$

$$x2 := \frac{a2 + M2 + 2L2}{a2 - b2} = 1.824$$

$$x3 := \frac{a3 + M3 + 2L3}{a3 - b3} = 3.037$$

$$x4 := \frac{a4 + M4 + 2L4}{a4 - b4} = 1.893$$

$$y1 := \frac{b1 + M1 + 2L1}{b1 - a1} = -1.778$$

$$y2 := \frac{b2 + M2 + 2L2}{b2 - a2} = -0.824$$

$$y3 := \frac{b3 + M3 + 2L3}{b3 - a3} = -2.037$$

$$y4 := \frac{b4 + M4 + 2L4}{b4 - a4} = -0.893$$

$$t := 1$$

$$R := 40\cdot 0.197 + 10^{5}\cdot 2.346\cdot 10^{-6} + 40\cdot 0.197 + 10^{3}\cdot 1.686\cdot 10^{-3} = 17.681$$

$$P1 := e^{-L1\cdot t} = 0.779$$

$$P2 := x2\cdot e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t} = 0.998$$

$$P3 := e^{-L3\cdot t} = 0.779$$

$$P4 := x4e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t} = 0.998$$

$$R1 := \int_0^1 \left[\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L1\cdot t}\right)\right]\cdot\left[1 - \left[1 - \left(x2e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t}\right)\right]^2\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot\left(x4e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t}\right) dt = 0.197$$

$$R2 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[\frac{d}{dt}\left[1 - \left[1 - \left[1 - \left(x2e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t}\right)\right]^2\right]\right]\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot\left(x4e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t}\right) dt = 2.346\times 10^{-6}$$

$$R3 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[1 - \left[1 - \left(x2e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t}\right)\right]^2\right]\cdot\left[\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-L3\cdot t}\right)\right]\cdot\left(x4e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t}\right) dt = 0.197$$

$$R4 := \int_0^1 e^{-L1\cdot t}\cdot\left[1 - \left[1 - \left(x2e^{a2\cdot t} + y2\cdot e^{b2\cdot t}\right)\right]^2\right]\cdot e^{-L3\cdot t}\cdot\left[\frac{d}{dt}\left[1 - \left(x4e^{a4\cdot t} + y4\cdot e^{b4\cdot t}\right)\right]\right] dt = 1.686\times 10^{-3}$$

2.3.6 Определение показателей надежности и суммарного риска усовершенствованной системы

Рассмотрим структурную схему ремонтируемой системы с постоянно включенным резервом. Ориентированный граф состояний такой системы изображен на рисунке 11. Он имеет 21 узел. Направление стрелок сверху вниз соответствует отказовым переходам, а снизу вверх – восстановлению элементов. На графе кружками отмечены исправные состояния, а квадратами – отказовые.

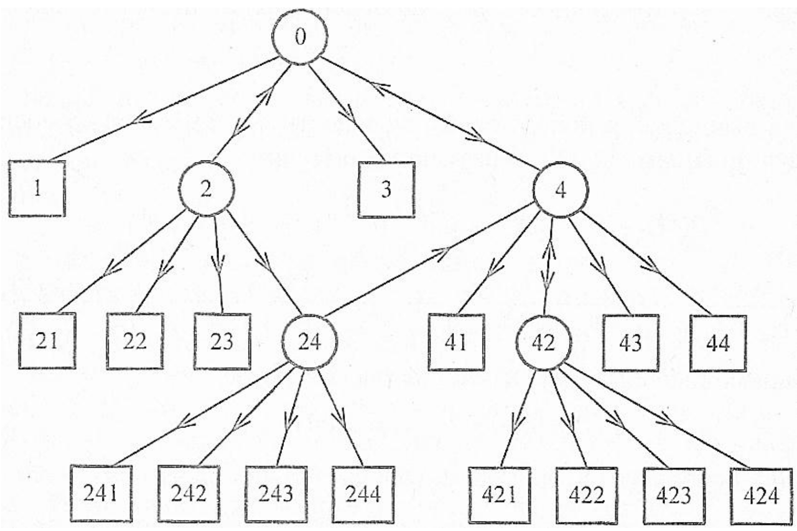


Рисунок 11 - График состояний восстанавливаемой системы

Интенсивности отказового перехода из каждого узла равны соответственно λ_1, λ_2, λ_3, λ_4, умноженным на число исправных элементов данной резервированной группы. Интенсивности ремонта для второй и четвертой подсистем равны соответственно μ_2 и μ_4. Согласно заданной дисциплине обслуживания первыми восстанавливаются элементы второй подсистемы, а затем – элементы четвертой подсистемы.

Для удобства записи системы уравнений пронумеруем узлы графа в естественном порядке. Тогда узлы (0), (2), (4), (8), (10) соответствуют исправным, а остальные узлы – отказовым состояниям. По графу составляется система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая в данном случае имеет вид:

$$\begin{cases} p_0'(t) = -(\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4)p_0(t) + \mu_2 p_2(t) + \mu_4 p_4(t); \\ p_1'(t) = \lambda_1 p_0(t); \\ p_2'(t) = 2\lambda_2 p_0(t) - (\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4 + \mu_2)p_2(t); \\ p_3'(t) = \lambda_3 p_0(t); \\ p_4'(t) = 2\lambda_4 p_0(t) - (\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4 + \mu_4)p_4(t) + \mu_2 p_8(t) + \mu_2 p_{10}(t); \\ p_5'(t) = \lambda_1 p_2(t); \\ p_6'(t) = \lambda_2 p_2(t); \\ p_7'(t) = \lambda_3 p_2(t); \\ p_8'(t) = 2\lambda_4 p_2(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_2)p_8(t); \\ p_9'(t) = \lambda_1 p_4(t); \\ p_{10}'(t) = 2\lambda_2 p_4(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_2)p_{10}(t); \\ p_{11}'(t) = \lambda_3 p_4(t); \\ p_{12}'(t) = \lambda_4 p_4(t); \\ p_{13}'(t) = \lambda_1 p_8(t); \\ p_{14}'(t) = \lambda_2 p_8(t); \\ p_{15}'(t) = \lambda_3 p_8(t); \\ p_{16}'(t) = \lambda_4 p_8(t); \\ p_{17}'(t) = \lambda_1 p_{10}(t); \\ p_{18}'(t) = \lambda_2 p_{10}(t); \\ p_{19}'(t) = \lambda_3 p_{10}(t); \\ p_{20}'(t) = \lambda_4 p_{10}(t); \end{cases} \tag{2.87}$$

Считая, что при $\boldsymbol{t} = 0$ все элементы системы исправны, получаем начальное условие: $\boldsymbol{p_0(0) = 1}$, $\boldsymbol{p_i(0) = 0}$, $\boldsymbol{i}$ = 1, 2,…, 20.

Система уравнений может быть решена численно с использованием метода Рунге – Кутты. Для этого необходимо подготовить исходные данные, содержащие матрицу коэффициентов системы дифференциальных уравнений, начальные значения искомых функций, начальное и конечное значения аргумента, шаг интегрирования и точность расчетов.

Заметим, что при вводе данных надо обязательно привести значения интенсивностей переходов к одной размерности. Для этого следует интенсивности восстановления элементов умножить на 8760, что соответствует переводу 1 часа в годы.

Поэтому

$$\mu_2 = \frac{8760}{100} = 87{,}6\ \text{лет}^{-1} \tag{2.88}$$

$$\mu_4 = \frac{8760}{100} = 87{,}6\ \text{лет}^{-1}. \tag{2.89}$$

В результате вычислений надо получить два файла. В первом файле содержатся значения всех 21 функций $p_i(t)$, i = 1, 2,…, 20 в зависимости от значения аргумента t, изменяющегося от 0 до 1 года с шагом 0,1 года. Далее представлены значения искомых функций только для конечного значения t = 1 год, вычисление производим в системе Mathcad:

p0(t) := (−L1 + 2·L2 + L3 + 2·L4)p0(t) + m2·p2(t) + m4·p4(t)
p1(t) := L1·p0(t)
p2(t) := 2·L2·p0(t) − (L1 + 2L2 + L3 + 2L4 + m2)·p2(t)
p3(t) := L3·p0(t)
p4(t) := 2·L4·p0(t) − (L1 + 2L2 + L3 + L4 + m4)·p4(t) + m2·p8(t) + m2·p10(t)
p5(t) := L1·p2(t)
p6(t) := L2·p2(t)
p7(t) := L3·p2(t)
p8(t) := 2·L4·p2(t) − (L1 + L2 + L3 + L4 + m2)·p8(t)
p9(t) := L1·p4(t)
p10(t) := 2·L2·p4(t) − (L1 + L2 + L3 + L4 + m2)·p10(t)
p11(t) := L3·p4(t)
p12(t) := L4·p4(t)
p13(t) := L1·p8(t)
p14(t) := L2·p8(t)
p15(t) := L3·p8(t)
p16(t) := L4·p8(t)
p17(t) := L1·p10(t)
p18(t) := L2·p10(t)
p19(t) := L3·p10(t)
p20(t) := L4·p10(t)

p0(t) = 0.265
p2(t) = 0.033
p3(t) = 0.066
p4(t) = 0.037
p5(t) = 8.281×10^{-3}
p6(t) = 2.07×10^{-3}
p7(t) = 8.281×10^{-3}
p8(t) = 4.638×10^{-3}
p9(t) = 9.275×10^{-3}
p10(t) = 4.638×10^{-3}
p11(t) = 9.275×10^{-3}
p12(t) = 2.597×10^{-3}
p13(t) = 1.159×10^{-3}
p14(t) = 2.898×10^{-4}
p15(t) = 1.159×10^{-3}
p16(t) = 3.246×10^{-4}
p17(t) = 1.159×10^{-3}
p18(t) = 2.898×10^{-4}
p19(t) = 1.159×10^{-3}
p20(t) = 3.246×10^{-4}

Приведенные значения используются дальше при нахождении риска системы. Во втором файле содержатся значения вероятности безотказной работы системы для значений t от 0 до 1 года с шагом 0.1 года. Эти значения получены суммированием вероятностей по всем исправным состояниям, т.е.

$$P(t) = p_0(t) + p_2(t) + p_4(t) + p_8(t) + p_{10}(t). \qquad (2.90)$$

P(t) := p0(t) + p2(t) + p4(t) + p8(t) + p10(t)

P(t) = 0.345

Второй файлы:

$$P(t) = e^{-\lambda_1 \cdot t} \cdot (3 - 3 \cdot e^{-\lambda_3 \cdot t}) \cdot (2 - e^{-\lambda_1 \cdot t}), \qquad (2.91)$$

$t := 0, 0.1 .. 1$

$L1 := 0.25$

$L2 := 0.0625$

$L3 := 0.25$

$L4 := 0.07$

$P(t) := e^{-L1 \cdot t} \cdot \left(3 - 3 \cdot e^{-L3 \cdot t}\right) \cdot \left(2 - e^{-L1 \cdot t}\right)$

Данные второго файла оформляются в виде таблицы 6.

Из таблицы следует, что $P(1) = 0.631$ для ремонтируемой системы несколько больше, чем $P(1) = 0.604$ для неремонтируемой системы.

Для определения наработки на отказ составим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} -(\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4)\tau_0 + \mu_2\tau_2 + \mu_4\tau_4 = -1; \\ 2\lambda_2\tau_0 - (\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4 + \mu_2)\tau_2 = 0; \\ 2\lambda_4\tau_0 - (\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_4)\tau_4 = 0; \\ 2\lambda_4\tau_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_2)\tau_8 = 0; \\ 2\lambda_4\tau_4 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_2)\tau_{10} = 0. \end{cases} \quad (2.92)$$

Таблица 6 - Вероятность безотказной работы системы

t, лет	P (t)
0,00	1
0,10	0,97
0,20	0,89
0,30	0,86
0,40	0,81
0,50	0,77
0,60	0,74
0,70	0,71
0,80	0,68
0,90	0,65
1,00	0,631

Решение этой системы в Mathcad дает следующие результаты:

$$\begin{cases} -(0.25 + 2\cdot 0.0625 + 0.25 + 2\cdot 0.07)\cdot \tau 0 + 87.6\cdot \tau 0 + 87.6\cdot \tau 4 = -1 \\ 2\cdot 0.0625\cdot \tau 0 - (0.25 + 2\cdot 0.0625 + 0.25 + 2\cdot 0.07 + 87.6)\cdot \tau 2 = 0 \\ 2\cdot 0.07\cdot \tau 0 - (0.25 + 2\cdot 0.0625 + 0.25 + 0.07 + 87.6)\cdot \tau 4 = 0 \\ 2\cdot 0.07\cdot \tau 2 - (0.25 + 0.0625 + 0.25 + 0.07 + 87.6)\cdot \tau 8 = 0 \\ 2\cdot 0.0625\cdot \tau 4 - (0.25 + 0.0625 + 0.25 + 0.07 + 87.6)\cdot \tau 10 = 0 \end{cases}$$

$\tau_0 = 1.3872, \tau_2 = 0.9807, \tau_4 = 0.96071, \tau_8 = 0.0015, \tau_{10} = 0.00136.$

Следовательно, среднее время безотказной работы системы будет равно:

$$T_1 = \tau_0 + \tau_2 + \tau_4 + \tau_8 + \tau_{10} = 3.331 \text{ год.}$$

```
t0 := 1.3872
t2 := 0.9807
t4 := 0.96071
t8 := 0.0015
t10 := 0.00136
T1 := t0 + t2 + t4 + t8 + t10
T1 = 3.331
```

$T_1 = 3.331$ лет, что больше, чем T_1= 1.936 лет для неремонтируемой системы.

Найдем суммарный риск системы в соответствии с формулой (2.33). Для этого по графу необходимо найти все состояния отказа и для каждого из них определить номер элемента, отказ которого привел к отказу системы.

Соответствие отказовых состояний и номеров отказавших элементов приведено в таблицу 7.

Таблица 7 - Номера элементов и их состояний

Номер состояния	Номер элемента	Номер состояния	Номер элемента	Номер состояния	Номер элемента
1	1	11	3	17	1
3	3	12	4	18	2
5	1	13	1	19	3
6	2	14	2	20	4
7	3	15	3		
9	1	16	4		

По формуле (2.33) получим:

$$R(t) = r_1 \cdot \big(p_1(t)+p_5(t)+p_{13}(t)+p_{17}(t)\big)+ r_2 \cdot \big(p_6(t)+p_{14}(t)+p_{18}(t)\big)+ \tag{2.93}$$
$$+ r_3 \cdot \big(p_3(t) + p_7(t) + p_{11}(t) + p_{15}(t) + p_{19}(t)\big)+ r_4 \cdot \big(p_{12}(t) + p_{16}(t) + p_{20}(t)\big).$$

Следовательно,

$$R(t) = 40 \cdot (0.265 + 0.008 + 0.001 + 0.001) + 10^5 \cdot (0.002 + 0.0002 + 0.0002)+$$
$$+ 40 \cdot (0.066 + 0.008 + 0.009 + 0.001 + 0.001)+ 10^3 \cdot (0.002 + 0.0003 + 0.0003)=$$
$$= 25.7.$$

Суммарный риск из-за отказа системы, равной $R(1) = 25.7$, стал меньше риска полученного для системы без восстановления и равного 34.34.

2.3.7 Определение показателей надежности и суммарного риска усовершенствованной системы (резерв замещением)

Граф состояний будет такой же, что и на рисунке 12. Другими будут только значения интенсивностей перехода вследствие отказов элементов. Этот раздел выполняется аналогично разделу 2.3.6.

2.3.8 Вывод по работе

По результатам проведенных исследований составлена таблица 8, в которой содержатся значения показателей надежности и риска системы для постоянно включенного резерва.

На основании данной таблицы необходимо сделать выводы о целесообразности мероприятий по восстановлению отказавших элементов. Следует отметить, что возможность ремонта элементов приводит к уменьшению кратности резервирования и сокращению объема оборудования.

Таблица 8 - Значения показателей надежности и риска резервированной системы

Система	Показатели надежности		Риск системы *R(1)*
	P(t)	T_1,лет	
Неремонтируемая	0,604	1,936	34,34
Ремонтируемая(неограниченное восстановление)	0,602	1,868	19,877
Ремонтируемая (ограниченное восстановление)	0,631	3,331	25,7

Список использованных источников

1. Голинкевич, Т.А. Прикладная теория надежности: учебник для вузов / Т.А. Голинкевич. – М.: Высшая школа, 1985. – 168 с.

2. Ефремов, И.В. Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие для студентов / И.В. Ефремов, Н.Н. Рахимова. – Ижевск.: [б.и.] 2013. – 197 с.

3. Острейковский, В.А.Теория надежности: учеб для вузов / В.А. Острейковский – М.: Высш. шк., 2003-463с.

4. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров – СПб.: БХВ Петербург, 2006. – 560с.

Приложение А
(обязательное)

Варианты заданий «Синтез оптимальной структуры»

Таблица А. 1 – Варианты заданий для выполнения курсовой работы «Синтез оптимальной структуры технической системы по обеспечению ее надежности»

Вариант		№ элемента системы									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
В 1	λ_i	1.2	7	8	0,3	3,2	8,	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	10	2	5	9	20	7	1	5	9	4
В 2	λ_i	0,8	0,6	5	1	0,8	12	5	14	13	8
	$t_{вi}$	10	2,5	2,3	4,6	6	8	1,2	1,3	15	8
В 3	λ_i	4	2,3	5,3	6	8	4,2	3,6	8	5	6
	$t_{вi}$	1.2	7	8	0,3	0,9	0,8	2	1	2	5
В 4	λ_i	5	3	3,6	2,3	5,2	8	9	2	4,5	6,1
	$t_{вi}$	0,9	0,8	2	1	2	8	1,2	1,3	15	8
В 5	λ_i	2,5	1,6	0,7	2,5	6	1,5	0,9	2,5	4,8	3
	$t_{вi}$	10	12	9	9,6	18	5,2	6	8	10	1
В 6	λ_i	5,6	0,6	5	1	0,8	12	5	14	13	8
	$t_{вi}$	0,9	0,8	2	1	2	8	1,2	1,3	15	8
В 7	λ_i	1,5	6	2,5	0,7	1,8	8,4	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	5	6	9	1,2	1,5	1,6	8	4,6	9	8
В 8	λ_i	11	25	6	9	3,3	12	5	14	13	8
	$t_{вi}$	10	2,5	2,3	4,6	6	8	1,2	1,3	15	8
В 9	λ_i	1.2	7	8	0,3	3,2	8,	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	7	1	5	4	8	7	1	5	9	4
В 10	λ_i	0,8	5	0,9	0,96	5,8	1,3	2	14	13	8
	$t_{вi}$	10	2,5	2,3	4,6	6	8	1,2	1,3	15	8

Продолжение таблицы А. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
В 12	λ_i	1.2	7	8	0,3	3,2	8,5	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	10	2	5	9	20	7	1	5	9	4
В 13	λ_i	0,8	0,6	5	1	0,8	12	5	14	13	8
	$t_{вi}$	10	2,5	2,3	4,6	6	8	1,2	1,3	15	8
В 14	λ_i	1.2	7	8	0,3	3,2	8,7	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	10	2	5	9	20	7	1	5	9	4
В 15	λ_i	12	5	14	5	9	4	10	11	13	8
	$t_{вi}$	10	14	2	9	8	4	1,2	1,3	15	8
В 16	λ_i	1.2	7	8	0,3	3,2	8,	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	1,4	22	5	6	9	8	7	8,5	4	8
В 17	λ_i	0,8	0,6	5	1	0,8	12	5	14	13	8
	$t_{вi}$	10	2,5	2,3	4,6	6	8	1,2	1,3	15	8
В 18	λ_i	1.2	7	8	0,3	3,2	8,9	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	10	9	6	3,2	5,5	7	1	5	9	4
В 19	λ_i	4,6	6	8	1,2	1,3	15	8	10	2,5	2,3
	$t_{вi}$	10	2,5	2,3	4,6	6	8	1,2	1,3	15	8
В 20	λ_i	1.2	7	8	0,3	3,2	8,	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	10	2	5	9	20	7	1	5	9	4
В 21	λ_i	5	14	13	8	3,2	8,	5,2	0,3	3,2	8,6
	$t_{вi}$	14	29	12	5	6	3	8	12	15	8
В 22	λ_i	1.2	7	8	0,3	3,2	8,	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	24	20	11	15	20	14	15	5	9	4
В 23	λ_i	0,8	0,6	5	1	0,8	12	5	14	13	8
	$t_{вi}$	10	2,5	2,3	4,6	6	8	1,2	1,3	15	8
В 24	λ_i	1.2	7	8	0,3	3,2	8,	5,2	4,5	1,2	9
	$t_{вi}$	10	2	5	9	20	7	1	5	9	4

Продолжение таблицы А. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
В 25	λ_i	11	6,5	1,5	3,2	8	6	5	4	2,3	9
	$t_{вi}$	1,2	5	3	9	1,1	15,5	1,3	14	1	3,6

Примечание – Интенсивность отказов элементов системы в таблице в масштабе $\lambda \cdot 10^{-3}$ ч $^{-1}$, размерность $t_{вi}$ - в часах.

Приложение Б
(обязательное)
Варианты заданий «Проектирование технической системы»

Таблица Б. 1 – Варианты заданий для выполнения курсовой работы «Проектирование технической системы по заданным показателям надежности и риска»

Вариант	n	m	t, лет	Характ.	Элем.1	Элем.2	Элем.3	Элем.4
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4	80	1,1	*T*, лет	13	4	15	3
				$T_в$, ч	25	25	110	60
				r,у.е.	1100	30	1000000	24
2	4	80	1,7	Т, лет	10	18	4	2
				$Т_в$, ч	140	220	60	100
				r, у.е.	5	4	17	13
3	4	90	1,37	Т, лет	90	90	220	90
				$Т_в$, ч	50	40	10000	1000
				r, у.е.	45	25	10000	1500
4	4	120	1,6	Т, лет	17	8	9	16
				$Т_в$, ч	130	95	26	187
				r, у.е.	15000	20	55	10000
5	4	110	1,9	Т, лет	17	25	1	12
				$Т_в$, ч	115	300	51	49
				r, у.е.	900	5000	10	25
6	4	80	1,8	Т, лет	2	17	10	6
				$Т_в$, ч	55	250	123	90
				r, у.е.	45	100000	10000	60
7	4	90	1,0	Т, лет	4	20	15	6
				$Т_в$, ч	35	180	120	60
				r, у.е.	36	100000	1000	60

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	4	110	1,92	T, лет	2	16	9	2
				$T_в$, ч	67	185	90	45
				r, у.е.	23	1000	10000	35
9	4	120	1,3	T, лет	5	11	3	18
				$T_в$, ч	66	200	55	170
				r, у.е.	30	900	10	105000
10	4	100	1,0	T, лет	4	13	13	5
				$T_в$, ч	40	160	130	100
				r, у.е.	70	100000	10000	50
11	4	90	1,2	T, лет	10	3	30	6
				$T_в$, ч	100	40	110	50
				r, у.е.	1500	40	100000	90
12	4	120	1,4	T, лет	5	17	5	6
				$T_в$, ч	90	150	20	60
				r, у.е.	30	1000	200	10
13	4	110	1,6	T, лет	5	4	4	15
				$T_в$, ч	70	100	10	150
				r, у.е.	40	50	60	10000
14	4	120	1,7	T, лет	3	30	5	13
				$T_в$, ч	70	140	100	90
				r, у.е.	20	1000	60	10000
15	4	100	1,0	T, лет	20	5	17	3
				$T_в$, ч	90	70	120	60
				r, у.е.	1000	40	1000000	60
16	4	80	1,6	T, лет	7	7	5	19
				$T_в$, ч	120	140	60	190
				r, у.е.	50	40	60	1000
17	4	90	1,0	T, лет	5	17	1	2
				$T_в$, ч	70	100	50	90
				r, у.е.	50	1000	70	40

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	4	120	1,9	Т, лет	5	17	5	16
				$Т_в$, ч	90	90	60	100
				r, у.е.	50	1000	10000	50
19	4	110	1,5	Т, лет	5	5	17	21
				$Т_в$, ч	110	20	220	50
				r, у.е.	20	30	10000	1000
20	4	100	1,3	Т, лет	5	2	25	17
				$Т_в$, ч	120	150	40	250
				r, у.е.	40	10	10000	1000
21	4	80	1,6	Т, лет	15	5	3	2
				$Т_в$, ч	100	50	160	60
				r, у.е.	1000	50	20	10
22	4	90	1,9	Т, лет	7	7	6	15
				$Т_в$, ч	50	130	40	250
				r, у.е.	50	20	30	10000
23	4	100	1,4	Т, лет	15	12	5	70
				$Т_в$, ч	70	100	90	90
				r, у.е.	50	100	1000	30
24	4	120	1,7	Т, лет	15	7	16	3
				$Т_в$, ч	200	40	250	50
				r, у.е.	1000	10000	20	20
25	4	110	1,8	Т, лет	15	13	4	4
				$Т_в$, ч	120	150	40	40
				r, у.е.	1000000	1000	30	10
26	4	90	1,4	Т, лет	30	13	5	9
				$Т_в$, ч	140	90	40	30
				r, у.е.	100	10000	1000	10
27	4	100	1,1	Т, лет	19	4	3	15
				$Т_в$, ч	130	130	50	90
				r, у.е.	10000	40	30	1000

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
28	4	80	1,6	T, лет	15	7	11	4
				$T_в$, ч	130	90	140	90
				r, у.е.	10000	30	100000	30
29	4	120	1,3	T, лет	13	15	5	4
				$T_в$, ч	150	180	200	30
				r, у.е.	10	100000	60	70
30	4	90	1,9	T, лет	3	6	5	19
				$T_в$, ч	120	130	200	200
				r, у.е.	40	60	100000	100