

МПС РОССИИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

19/18/2

Одобрено кафедрой
“Автоматика и телемеханика
на железнодорожном
транспорте”

Утверждено
деканом факультета
“Управление процессами
перевозок”

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Рабочая программа
и задание на контрольную работу
с методическими указаниями
для студентов IV курса

специальности

**210700. АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ (АТС)**



Москва – 2003

Разработана на основании примерной учебной программы данной дисциплины, составленной в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки инженера по специальности 210700. Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте.

Составитель — канд. техн. наук, доц. А.В. ГОРЕЛИК
Рецензент — канд. техн. наук, доц. Ю.Н. ПАНКОВ

Курс — IV
Всего часов — 120 ч.
Лекционные занятия — 8 ч.
Практические занятия — 8 ч.
Контрольная работа (количество) — 1
Самостоятельная работа — 89 ч.
Экзамены (количество) — 1

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Рабочая программа
и задание на контрольную работу
с методическими указаниями

Редактор *Г.В. Тимченко*
Компьютерная верстка *Н.Ф. Цыганова*

ЛР № 020307 от 28.11.91

Тип. зак.	Изд. зак. 144	Тираж 900 экз.
Подписано в печать	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 1,75		Формат 60×90 ¹ / ₁₆

Издательский центр РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2
Типография РГОТУПС, 107078, Москва, Басманный пер., 6

© Российский государственный открытый технический университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации, 2003

Рабочая программа

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цель преподавания дисциплины

Предметом изучения дисциплины является теория надежности устройств автоматики, телемеханики и связи. Надежность есть важнейшая характеристика систем «человек-техника», от которой зависит эффективность их применения по назначению. Целью изучения дисциплины является подготовка студентов к решению проблем оценки и повышения надежности при изучении конкретных систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

1.2. Задачи изучения дисциплины

Изучив дисциплину, студент должен:

1.2.1. *Знать и уметь* использовать основные понятия и математические методы теории надежности элементов и систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, методы обеспечения безопасности систем.

1.2.2. *Владеть* методами расчета надежности и безопасности для систем автоматики, телемеханики и связи. Иметь представление о проблемах надежности и безопасности, возникающих в связи с современными тенденциями развития микроэлектронной и микропроцессорной техники в области железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение

Роль систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи в организации бесперебойного и безопасного движения поездов. Требования к системам с точки зрения надежности и безопасности. Экономические и социальные последствия отказов в системах «человек-техника». Тенденции развития систем и проблемы надежности. Эффективность повышения надежности.

Предмет и содержание дисциплины, связь с другими дисциплинами.

Раздел 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Определение надежности. Безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Виды отказов. Состояния технической системы с точки зрения надежности. Восстанавливаемые и невосстанавливаемые системы. [1, гл. 21.1; 2, гл. 1.1].

Количественные показатели безотказности и ремонтпригодности. Нарботка до отказа. Вероятность безотказной работы. Интенсивность отказов. Время восстановления. Комплексные показатели надежности. Зависимости между показателями надежности. [1, гл. 21.3–21.4.; 2, гл. 1.2–1.4].

Требования к показателям надежности проектируемых систем.

Раздел 2

МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Потоки отказов. Законы распределения времени между отказами. Экспоненциальный закон надежности. Определение показателей надежности при различных законах распределения времени между отказами. [1, гл. 21.6–21.7]

Расчет надежности невосстанавливаемых систем. Метод расчета с помощью полной группы событий. Понятие о структурной схеме надежности. Виды резервирования. Методы расчета надежности резервированных систем. [1, гл. 22.1–22.2; 2, гл. 3.1–3.2.].

Расчет надежности восстанавливаемых систем. Способы восстановления. Понятие о графе состояния системы. Использование теории марковских процессов для расчета надежности. [1, гл. 22.3; 2, гл. 3.3–3.4.].

Определение показателей надежности систем в результате испытаний. Точечные и интервальные оценки показате-

лей надежности. Эксплуатационная надежность с учетом технического обслуживания. Методы планирования регламентных проверок и профилактических работ. [1, гл. 23.6–23.8.].

Раздел 3

НАДЕЖНОСТЬ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Анализ надежности микроэлектронных компонентов и микропроцессоров. Виды отказов микросхем и печатных плат. Надежность процессоров, запоминающих устройств и интерфейса. Факторы, влияющие на надежность. Влияние электромагнитной совместимости на надежность микроэлектронных систем. [1, гл. 23.8.].

Надежность программного обеспечения. Отказы программ. Сравнение аппаратных и программных средств по надежности. Принципы разработки надежного программного обеспечения. [2, гл. 2.].

Расчет надежности логических элементов. Расчет надежности комбинационных схем и схем с памятью. Надежность отказоустойчивых схем. Методы расчета показателей надежности дискретных систем. Надежность дублированной и мажоритарной структур. Надежность систем с контролем в процессе функционирования. [1, гл. 23.1–23.5]

Раздел 4

ТЕОРИЯ БЕЗОПАСНОСТИ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Понятие о безопасности технической системы и опасном отказе. Состояния технической системы с точки зрения безопасности. Показатели безопасности. Связь между надежностью и безопасностью. Система отраслевых стандартов

«Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики». [1, гл. 21.5; 2, гл. 4.1–4.4; 3].

Методы расчета показателей безопасности дискретных систем управления. Безопасность избыточных структур. Оценка безопасности систем со средствами встроенного контроля. Влияние на безопасность ошибок человека. [2, гл. 4.1–4.2; 3].

Раздел 5

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

Статистические данные об отказах и показателях надежности элементов железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Надежность релейной аппаратуры. Причинный анализ отказов реле. Надежность рельсовых цепей и их элементов. Надежность кабельных и воздушных линий связи. Надежность электроприводов, светофоров и источников питания. [1, гл. 23.6–23.8]

Влияние надежности систем автоматики, телемеханики и связи на пропускную способность железных дорог. Надежность систем электрической централизации, автоблокировки, горочной автоматики и связи. [1, гл. 23.6–23.8]

Пути повышения надежности систем автоматики и связи. Создание надежной элементной базы. Проблема разработки высоконадежных необслуживаемых систем. Применение прогрессивных методов технического обслуживания.

Системы и методы сбора и обработки информации об отказах. [1, гл. 23.6]

3. ВИДЫ РАБОТ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВРЕМЕНИ

Лекционные занятия — 8 ч

Практические занятия — 8 ч

Контрольная работа (количество) — 1

Экзамен (количество) — 1

4. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ЛЕКЦИОННЫХ ЗАНЯТИЙ (8 час)

№ п/п	Наименование темы	Количество часов
1	Определение надежности. Безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Виды отказов. Состояния технической системы с точки зрения надежности. Восстанавливаемые и невосстанавливаемые системы	1
2	Количественные показатели безотказности и ремонтпригодности. Нарботка до отказа. Вероятность безотказной работы. Интенсивность отказов. Комплексные показатели надежности. Зависимости между показателями надежности. Экспоненциальный закон надежности	2
3	Расчет надежности невосстанавливаемых систем. Понятие о структурной схеме надежности. Виды резервирования. Методы расчета надежности резервированных систем	2
4	Расчет надежности восстанавливаемых систем. Способы восстановления. Понятие о графе состояния системы. Использование теории марковских процессов для расчета надежности	1
5	Анализ надежности микроэлектронных компонентов и микропроцессоров. Надежность дублированной и мажоритарной структур	1
6	Понятие о безопасности технической системы и опасном отказе. Состояния технической системы с точки зрения безопасности. Показатели безопасности. Связь между надежностью и безопасностью. Система отраслевых стандартов "Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики"	1

5. ТИПОВЫЕ ПРИМЕРЫ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Пример 5.1. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 ч. отказало 50 изделий. За интервал времени 4000–4100 ч. отказало еще 20 изделий. Требуется определить частоту и интенсивность отказов изделий в промежутке времени 4000–4100 ч. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа изделий за первые 4000 ч. Вычис-

6. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. — М.: Энергия. 1977.

7. Иыуду К.А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем: Учеб. пос для вузов. — М.: Высшая школа., 1989.

8. Лисенков В.М. Безопасность технических средств в системах управления движением поездов. — М.: Транспорт, 1992.

9. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Талалаев В.И. и др.; /Под ред. Вл.В. Сапожникова. — М.: Транспорт, 1997.

10. Станционные системы автоматики и телемеханики: Учебник для ВУЗов железнодорожного транспорта /Вл.В. Сапожников, Б.Н. Елкин, И.М. Кокурин и др.; Под ред. Вл.В. Сапожникова. — М.: Транспорт, 1997.

11. Горелик А.В. Математическая модель для расчета периодичности техобслуживания устройств железнодорожной автоматики // Автоматика, связь, информатика. 2002. № 6. с. 40–41.

6.3. Другие методические материалы и пособия

1. Ушаков А.И., Козлов Б.А. Справочник по расчету надежности устройств радиоэлектроники и автоматики. — М.: Советское радио, 1985.

2. Сборник задач по теории надежности/ Под ред. Половко А.М., Маликова И.М. — М.: Советское радио, 1972.

3. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

4. ГОСТ 19.640-74. Надежность в технике. Расчет показателей безопасности невосстанавливаемых объектов (без резервирования).

5. ОСТ 32.17-92. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Основные понятия. Термины и определения.

6. РТМ 32 ЦШ 1115842.02-94. Руководящий технический материал. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы расчета показателей безотказности и безопасности СЖАТ.

7. РТМ 32 ЦШ 1115842.01-94. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы и принципы обеспечения безопасности микроэлектронных СЖАТ.

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ С МЕТОДИЧЕСКИМИ УКАЗАНИЯМИ

Контрольная работа состоит из четырех задач. В качестве методических рекомендаций условия задач дополнены типовыми примерами решений аналогичных задач. Решения каждой задачи должны быть подробными, с корректной записью промежуточных и окончательных результатов. Для каждой задачи в соответствии с вариантом необходимо записать условие и при необходимости изобразить поясняющий рисунок. Решение каждой задачи следует начинать с новой страницы.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Вероятность безотказной работы или *функция надежности* $P(t)$ выражает вероятность того, что невосстанавливаемый объект не откажет к моменту времени наработки t .

Дополнение вероятности безотказной работы до единицы $Q(t) = 1 - P(t)$ называется *вероятностью отказа* или *функцией ненадежности*. Вероятность отказа $Q(t)$ — вероятность того, что случайное время до отказа меньше заданного времени t . В результате испытаний можно определить $P(t)$ лишь приближенно, в виде статистической оценки, обозначаемой тильдой, т.е.

$$\tilde{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0},$$

где $n(t)$ — количество объектов, отказавших к моменту времени t , при их исходном количестве N_0 .

Плотность распределения наработки до отказа называют *частотой отказов*. Экспериментально частота отказов определяется как отношение числа отказавших объектов в единицу времени к первоначальному числу объектов при условии, что все вышедшие из строя объекты не восстанавливаются. Согласно этому определению

$$\tilde{\alpha} = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t},$$

где $n(\Delta t)$ — число отказавших объектов в интервале времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$.

Средняя наработка до отказа \bar{T}_o определяется как математическое ожидание времени до первого отказа. Средняя наработка до отказа является средним показателем и не отражает характер распределения времени до отказа.

По статистическим данным об отказах средняя наработка до первого отказа вычисляется по формуле

$$\bar{T}_o = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0},$$

где t_i — время безотказной работы i -го объекта.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ выражает интенсивность процессов возникновения отказов.

Статистическая интенсивность отказов определяется отношением числа отказавших объектов в единицу времени к среднему числу объектов, исправно работающих в данный отрезок времени.

$$\tilde{\lambda} = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t},$$

где $N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$ — среднее число исправно работающих объектов в интервале Δt ;

N_i — число объектов, исправно работающих в начале интервала Δt ;

N_{i+1} — число объектов, исправно работающих в конце интервала Δt .

Вероятностная оценка этой характеристики находится из выражения

$$\lambda(t) = \frac{\alpha(t)}{P(t)}.$$

Наиболее распространенной статистической моделью надежности является *экспоненциальная модель распределе-*

ния времени до отказа, по которой вероятность безотказной работы объекта выражается зависимостью

$$P_o(t) = e^{-\lambda t},$$

где λ — параметр модели (интенсивность отказов)

Пусть отказы элементов есть независимые друг от друга события. Так как система работоспособна, если работоспособны все ее элементы, то согласно теореме об умножении вероятностей вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ равна произведению вероятностей безотказной работы ее элементов:

$$P_c(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot \dots \cdot p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t),$$

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

Пусть для элементов справедлив экспоненциальный закон распределения надежности и известны их интенсивности отказов. Тогда и для системы справедлив экспоненциальный закон распределения надежности:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i} = e^{-\lambda_c t},$$

где λ — интенсивность отказов системы.

Интенсивность отказов нерезервированной системы равна сумме интенсивностей отказов ее элементов:

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

Если все элементы данного типа равнонадежны, то интенсивность отказов системы будет

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i,$$

где: N_i — число элементов i -го типа;
 r — число типов элементов.

Выбор λ_i для каждого типа элементов производится по соответствующим таблицам.

Среднее время наработки до отказа и частота отказов системы соответственно равны:

$$\bar{T}_{o.c} = \frac{1}{\lambda_c}, \quad \alpha_c(t) = \lambda_c e^{-\lambda_c t}.$$

В резервированной системе отказ какого-либо элемента не обязательно приводит к отказу всей системы. Типичным случаем является логически параллельное соединение элементов (рис. 2), при котором система отказывает тогда, когда отказывают все ее элементы. Такой тип резервирования называют постоянным или нагруженным $(m-1)$ -кратным резервированием. В этом случае все элементы выполняют одну и ту же функцию, работают одновременно и равнонадежны. По теореме умножения вероятностей имеют место следующие выражения:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - q^m(t) = 1 - [1 - p(t)]^m,$$

где $q(t), p(t)$ — соответственно вероятности отказа и безотказной работы одного элемента.

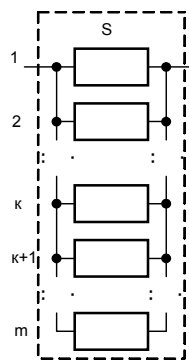


Рис. 2. Схема логического соединения элементов резервированной системы

Если для элементов справедлив экспоненциальный закон распределения надежности, то

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

ЗАДАЧА 1

На испытание поставлено N_0 изделий. За время t ч. вышло из строя $n(t)$ штук изделий. За последующий интервал времени Δt вышло из строя $n(\Delta t)$ изделий. Необходимо вычислить вероятность безотказной работы за время t и $t + \Delta t$, частоту отказов и интенсивность отказов на интервале Δt . Исходные данные для решения задачи приведены в табл. 1.

Таблица 1

Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра	N_0	$t, \text{ч}$	Δt	$n(t)$	$n(\Delta t)$
1	2	3	4	5	6	7
Четная или 0	1	1000	8000	1000	290	50
	2	1000	14000	1000	540	50
	3	100	5000	100	10	10
	4	100	4000	200	20	20
	5	100	3000	1000	20	20
	6	1000	800	100	216	15
	7	1000	2300	100	417	13
	8	1000	1200	100	274	14
	9	1000	900	100	231	14
	0	1000	10000	1000	370	40
Нечетная	1	1000	15000	1000	590	40
	2	1000	21000	1000	840	50
	3	1000	11000	1000	410	40
	4	1000	1300	100	288	13
	5	1000	1900	100	368	12
	6	1000	2700	100	480	25
	7	100	6000	500	50	20
	8	100	4000	1000	10	6
	9	100	10000	1000	25	5
	0	1000	1400	100	301	14

Типовой пример: На испытание поставлено $N_0=400$ изделий. За время $t=3000$ ч. отказало $n(t)=200$ изделий, за интервал времени $\Delta t=100$ ч. отказало $n(\Delta t)=100$ изделий (рис. 3). Требуется определить $\bar{P}(3000)$, $\bar{P}(3100)$, $\bar{P}(3050)$, $\bar{\alpha}(3050)$, $\bar{\lambda}(3050)$.

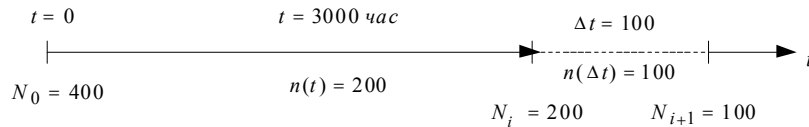


Рис. 3. Временной график

Решение. 1. По формуле $\bar{P}(t) = (N_0 - n(t))/N_0$ найдем вероятность безотказной работы:

для $t_n = 3000$ ч (начало интервала)

$$\bar{P}(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400 - 200}{400} = 0,5$$

для $t_k = 3100$ ч (конец интервала)

$$\bar{P}(3100) = \frac{N_0 - n(3100)}{N_0} = \frac{400 - 300}{400} = 0,25.$$

Определим среднее число исправно работающих образцов в интервале Δt :

$$N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2} = \frac{200 + 100}{2} = 150.$$

Число отказавших изделий за время $t = 3050$ ч.

$$n(3050) = N_0 - N_{cp} = 400 - 150 = 250,$$

тогда
$$\bar{P}(3050) = \frac{N_0 - n(3050)}{N_0} = \frac{400 - 250}{400} = 0,375.$$

2. По формуле $\bar{a}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}$ определяем частоту отказа:

$$\bar{a}(3050) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t} = \frac{100}{100 \cdot 400} = 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{ч}.$$

3. По формуле $\bar{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t}$ определяем интенсивность

отказа

$$\bar{\lambda}(3050) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t} = \frac{100}{100(200 + 100)/2} = 6,7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{ч}.$$

Интенсивность отказа можно также определить по фор-

муле $\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}$:

$$\bar{\lambda}(3050) = \frac{\bar{a}(3050)}{\bar{P}(3050)} = \frac{0,0025}{0,375} = 6,7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{ч}.$$

ЗАДАЧА 2

Необходимо выполнить ориентировочный расчет надежности систем, состоящей из N элементов различного типа. Требуется вычислить вероятность безотказной работы системы в течение времени t и среднюю наработку до первого отказа T_{cp} .

Расчет следует выполнить по данным о надежности элементов, приведенным в прил. 1.

Исходные данные для решения задачи приведены в табл. 2. Количество силовых трансформаторов N_{ct} соответствует последней цифре учебного шифра (цифра 0 соответствует $N_{ct}=10$).

Типовой пример: Изделие состоит из 14 маломощных низкочастотных германиевых транзисторов, 4 плоскостных кремниевых выпрямителей, 56 керамических конденсаторов, 168 резисторов типа МЛТ мощностью 0,5 Вт, 1 силового трансформатора, 2 накальных трансформаторов, 6 дросселей и 3 катушек индуктивности. Необходимо найти вероят-

Наименование и количество элементов

Пределения выбра шифра	Резисторы R		Конденсаторы С		Диоды D		Транзисторы T		Сло- вые транс- фор- ма- торы шт	Дрос- сел, шт	L шт	Время работы t, ч
	тип	шт	тип	шт	тип	шт	тип	шт				
0	ВС-0,25 ВС-0,5 ВС-1 МЛТ-0,5 МЛТ-1 МЛТ-2	20 14 6 32 19 4	слодяные танталовые	10 12	точечные германиевые, выпрямительные	6	мощные низкочастотные маломощные низкочастотные германиевые	5 4	N _{ст}	1	2	650
1	МЛТ-0,25 МЛТ-0,5 МЛТ-1 МЛТ-2	40 2 21 5 13 10 2 25 2	керамические танталовые	8 15	точечные германиевые, выпрямительные	9	мощные низкочастотные маломощные низкочастотные германиевые	4 11	N _{ст}	2	4	260
2	МЛТ-0,25 МЛТ-1 МЛТ-2	40 2 4	слодяные керамические танталовые	30 49 6	выпрямительные плоскостные	2	маломощные низкочастотные керамические	10	N _{ст}	-	40	5000
3	МЛТ-0,25 МЛТ-0,5 МЛТ-1 МЛТ-2	21 5 3 13 10 2	слодяные	8	точечные кремниевые выпрямительные	16	маломощные керманиевые	7	N _{ст}	2	-	2000
4	МЛТ-0,25 МЛТ-0,5 ПКВ-2	13 10 2	керамические танталовые	18 3	точечные германиевые выпрямительные	5	маломощные германиевые низкочастотные	6	N _{ст}	3	2	250
5	МЛТ-0,25 ПКВ-2	25 2	керамические танталовые	27 6	точечные кремниевые	10	мощные высокочастотные германиевые	10	N _{ст}	3	5	500
6	ВС-0,25 МЛТ-1 МЛТ-2	16 10 3	керамические танталовые	6 6	точечные импульсные	16	маломощные низкочастотные германиевые	7	N _{ст}	3	2	320
7	МЛТ-0,5 МЛТ-1 СПО-2 ПЭВ-10	240 86 3 5	слодяные танталовые бумажные	53 13 176	плоскостные выпрямительные кремниевые повышенной мощности	57 116	мощные низкочастотные мощные низкочастотные германиевые	69 86	N _{ст}	-	47	26
8	МЛТ-0,25 МЛТ-0,5 ПКВ-2	136 96 12	керамические танталовые	176 32	точечные германиевые выпрямительные	47	маломощные низкочастотные германиевые	63	N _{ст}	37	21	25

ность безотказной работы изделия в течение $t=260$ ч и среднюю наработку до первого отказа $T_{ср.с}$.

Решение. Для выполнения ориентировочного расчета надежности составим и заполним табл. 3, вычислив величину интенсивности отказов изделия. Значение интенсивностей отказов λ_i элементов (четвертая графа) выбирается из таблиц прил. 1. Заполненная табл. 3 приведена ниже.

Таблица 3

Наименование и тип элемента	Обозначение по схеме	Количество элементов N _i	Интенсивность отказов, 10 ⁻⁵ 1/ч	N _i · λ _i , 10 ⁻⁵ 1/ч	Примечание
Транзистор маломощный низкочастотный германиевый		14	0,3	4,2	Табл. П. 1.3
Выпрямитель плоскостный кремниевый		4	0,5	2	Табл. П. 1.3
Конденсатор керамический		56	0,14	7,84	Табл. П. 1.2
Резистор МЛТ, 0,5 Вт		168	0,05	8,4	Табл. П. 1.1
Трансформатор силовой		1	0,3	0,3	Табл. П. 1.4
Трансформатор накальный		2	0,2	0,4	Табл. П. 1.4
Дроссель		6	0,1	0,6	Табл. П. 1.4
Катушка индуктивности		3	0,05	0,15	Табл. П. 1.4

$$\sum_{i=1}^8 N_i = 254, \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^8 N_i \lambda_i = 23,89 \cdot 10^{-5} \quad 1/\text{ч};$$

По данным таблицы находим

$$P_c(260) = e^{-\lambda_c t} = e^{-23,89 \cdot 10^{-5} \cdot 260} \approx 0,94,$$

$$T_{ср.с} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{23,89 \cdot 10^{-5}} = 4170 \text{ ч.}$$

ЗАДАЧА 3

Схема расчета надежности резервированного устройства для различных вариантов приведена на рис. 4. Интенсивности отказов элементов имеют следующие значения:

$$\lambda_1 = n_1 \cdot 10^{-4} \quad 1/\text{час}; \quad \lambda_2 = n_2 \cdot 10^{-4} \quad 1/\text{ч}; \quad \lambda_3 = \frac{1}{n_1} \cdot 10^{-3} \quad 1/\text{час},$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{n_2} \cdot 10^{-3} \quad 1/\text{ч}; \quad \text{где } n_1 \text{ — последняя цифра учебного шифра}$$

(цифра 0 соответствует $n_1=10$); n_2 — предпоследняя цифра учебного шифра (цифра 0 соответствует $n_2=10$). Предполагается, что последствие отказов элементов отсутствует. Необходимо найти среднюю наработку до первого отказа устройства и вероятность его безотказной работы в течение 100 часов.

Типовой пример. Схема расчета надежности резервированного устройства приведена на рис. 5. Интенсивности отказов элементов имеют следующие значения:

$\lambda_1 = 0,23 \cdot 10^{-3} \quad 1/\text{ч}; \quad \lambda_2 = 0,5 \cdot 10^{-4} \quad 1/\text{ч}; \quad \lambda_3 = 0,4 \cdot 10^{-3} \quad 1/\text{ч}$. Предполагаем, что последствие отказов элементов отсутствует. Необходимо найти среднюю наработку до первого отказа устройства.

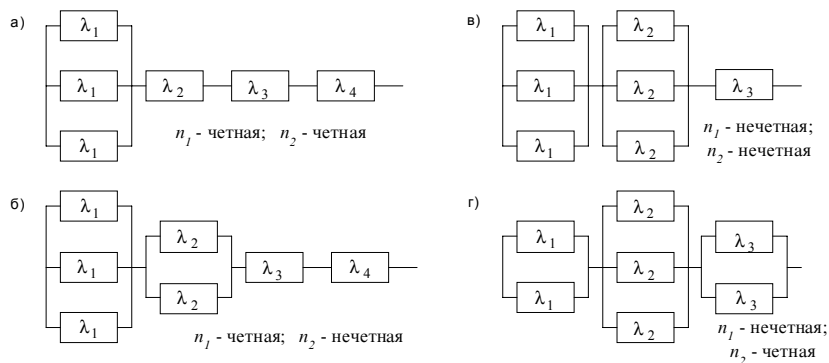


Рис. 4

Решение. Готовой формулы для средней наработки до первого отказа в рассматриваемом случае нет. Поэтому необходимо воспользоваться соотношением

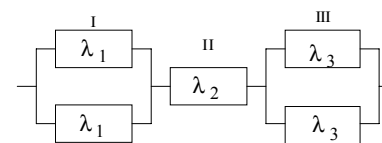


Рис. 5. Схема расчета надежности

$$T_{cp.c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt.$$

Найдем выражение для вероятности безотказной работы $P_c(t)$ устройства. Очевидно, $P_c(t) = p_I(t)p_{II}(t)p_{III}(t)$,

$$\text{где } p_I(t) = 1 - [1 - p_1(t)]^2 = 2p_1(t) - p_1^2(t),$$

$$p_{III}(t) = 1 - [1 - p_3(t)]^2 = 2p_3(t) - p_3^2(t).$$

Тогда, подставляя значения $p_I(t)$ и $p_{III}(t)$ в выражение для $P_c(t)$, получим

$$P_c(t) = [2p_1(t) - p_1^2(t)]p_2(t)[2p_3(t) - p_3^2(t)] = 4p_1(t)p_2(t)p_3(t) - 2p_1^2(t)p_2(t)p_3(t) - 2p_1(t)p_2(t)p_3^2(t) + p_1^2(t)p_2(t)p_3^2(t)$$

Так как $p_1(t) = e^{-\lambda_1 t}$, $p_2(t) = e^{-\lambda_2 t}$, $p_3(t) = e^{-\lambda_3 t}$, то

$$P_c(t) = 4e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} - 2e^{-(2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} - 2e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_3)t} + e^{-(2\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_3)t} = 4e^{-0,68 \cdot 10^{-3}t} - 2e^{-0,91 \cdot 10^{-3}t} - 2e^{-1,08 \cdot 10^{-3}t} + e^{-1,31 \cdot 10^{-3}t}$$

$$T_{cp.c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{4}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} - \frac{2}{2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} - \frac{2}{\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_3} + \frac{1}{2\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_3}.$$

Подставляя в выражение для $T_{cp.c}$ значение интенсивности отказов из условия задачи, получаем

$$T_{cp.c} = \frac{4}{10^{-3}(0,23 + 0,05 + 0,4)} - \frac{2}{10^{-3}(0,46 + 0,05 + 0,40)} - \frac{2}{10^{-3}(0,23 + 0,05 + 0,8)} + \frac{1}{10^{-3}(0,46 + 0,05 + 0,8)} \approx 2590 \text{ ч.}$$

ЗАДАЧА 4

Составить систему уравнений Колмогорова для графа состояний резервированной системы, изображенного на рис. 6. (в соответствии с вариантом). В данном случае G_0 и G_1 — работоспособные состояния системы; G_2 — неработоспособное состояние; P_i — вероятность нахождения системы в i -ом состоянии; λ — интенсивность отказа; μ — интенсивность восстановления. Рассчитать коэффициент готовности системы ($K_r = P_0 + P_1$), решив полученную систему уравнений.

$$\lambda = n_1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч}; \quad \mu = n_2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч};$$

где n_1, n_2 — соответственно последняя и предпоследняя цифра учебного шифра (для 0 n_1 и n_2 соответственно равны 10).

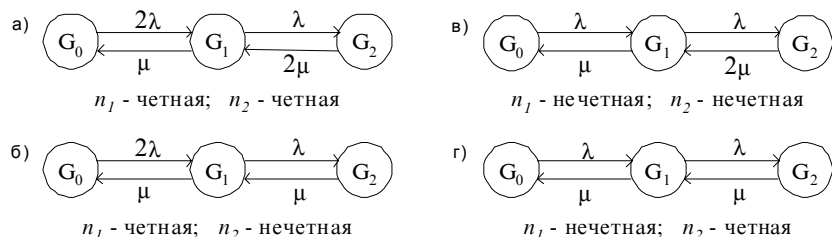


Рис. 6

Нерезервированная восстанавливаемая система в произвольный момент времени находится в одном из двух состояний: работоспособном (G_0) или неработоспособном (G_1). Процесс ее функционирования можно отразить графом состояний (рис. 7):

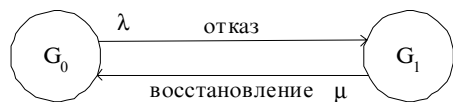


Рис. 7. Граф состояний нерезервированной системы

Из состояния G_0 в состояние G_1 система переходит в результате отказов с интенсивностью λ , а из G_1 в G_0 — в результате восстановления с интенсивностью μ . В дальнейшем будем считать, что потоки отказов и восстановлений являются простейшими: $\lambda = const$, $\mu = const$. Это значит, что производительность труда ремонтника постоянна и не зависит от времени. Поэтому время восстановления имеет экспоненциальный закон распределения $F(t) = 1 - e^{-\mu t}$;

$$T_6 = \frac{1}{\mu}.$$

Процесс функционирования резервированной восстанавливаемой системы является марковским случайным процессом с дискретными состояниями. Случайный процесс называется дискретным, если его состояние можно пронумеровать и переход из состояния в состояние происходит скачком. Резервированная восстанавливаемая система описывается графом состояний (рис. 8).

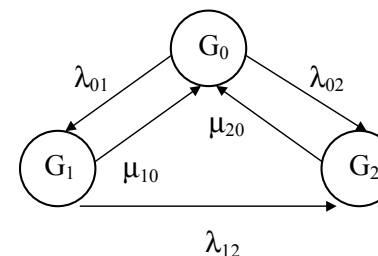


Рис. 8. Граф состояний резервированной системы

В отличие от нерезервированной системы резервированная система в общем случае имеет три состояния: G_0 — исправное, G_1 — неисправное, но работоспособное, G_2 — неработоспособное.

Переход системы из состояния в состояние происходит под воздействием потоков отказов и восстановлений. Если все потоки событий, переводящие систему из состояния в

состояние, являются пуассоновскими, то случайный процесс есть марковский процесс и задается системой дифференциальных уравнений.

Система составляется по следующим правилам. Производная вероятности состояния равна сумме стольких слагаемых, сколько стрелок связано с этим состоянием. Каждое слагаемое равно произведению интенсивности потока событий, переводящего систему по данной стрелке, на вероятность того состояния, из которого исходит стрелка. Слагаемое имеет знак минус, если стрелка исходит из данного состояния, а знак плюс — если стрелка направлена в данное состояние. Полученная система уравнений называется системой уравнений Колмагорова.

Например, для графа состояний, показанного на рис. 8, получим следующую систему дифференциальных уравнений.

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\check{e}_{01}P_0(t) - \check{e}_{02}P_0(t) + \hat{i}_{10}P_1(t) + \hat{i}_{20}P_2(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \check{e}_{01}P_0(t) - \hat{i}_{10}P_1(t) + \check{e}_{12}P_2(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \check{e}_{02}P_0(t) + \check{e}_{12}P_1(t) - \hat{i}_{20}P_2(t) \end{cases}$$

Система решается с помощью преобразований Лапласа или численными методами. При $t \rightarrow \infty$ справедлива предельная теорема А.А. Маркова: *если все интенсивности потоков событий постоянны, а граф состояний таков, что из каждого состояния можно перейти в каждое другое за конечное число шагов, то предельные вероятности состояний существуют и не зависят от начального состояния системы.* В соответствии с этой теоремой при $t \rightarrow \infty$ производная $\frac{dP_i(t)}{dt} \rightarrow 0$ и система дифференциальных уравнений превращается в однородную систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} -\lambda_{01}P_0(t) - \lambda_{02}P_0(t) + \mu_{10}P_1(t) + \mu_{20}P_2(t) = 0 \\ \lambda_{01}P_0(t) - \mu_{10}P_1(t) + \lambda_{12}P_2(t) = 0 \\ \lambda_{02}P_0(t) + \lambda_{12}P_1(t) - \mu_{20}P_2(t) = 0 \end{cases}$$

Система дополняется нормировочным уравнением

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1.1

Номинальная интенсивность отказов резисторов при $T^{\circ}=+20^{\circ}\text{C}$ и $K_n=1$

Тип резисторов	Номинальная мощность рассеяния $P_{ном}$, Вт														
	Интенсивность отказов $\lambda_0, 10^6/1/ч$														
	0,25	0,5	1	2	5	10	15	20	25	30	50	60	75	100	
Непроволочные	МЛТ	0,4	0,5	1,0	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	ТВО	0,4	0,45	0,8	1,4	2,2	3,0	4,0	-	-	-	6,0	-	-	
	МОУ	0,5	0,55	1,1	1,5	2,3	3,1	-	4,2	-	5,5	-	-	10	
	МУН	0,6	0,6	1,2	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	УНУ	0,6	0,7	1,2	1,7	2,3	3,0	-	4,8	-	8,0	-	-	12	
	КЭВ	0,6	0,75	1,3	1,75	2,4	3,1	-	5,0	-	-	-	-	-	
	ВС	0,7	0,8	1,35	1,8	2,5	3,3	-	-	-	-	-	-	-	
	УЛИ	0,6	0,65	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	БЛП	0,7	0,75	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	СПО	0,6	0,7	1,15	1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	СП	0,7	0,8	1,3	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Проволочные	ПТН	-	1,1	1,4	1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		ПКВ	-	1,2	1,5	2,0	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-
		ПЭВ	-	1,6	2,0	2,6	2,9	3,2	3,5	4,5	5,0	5,6	-	8,0	12
		ППП	-	-	2,2	2,6	3,0	-	-	-	-	-	-	-	-
РП		-	-	-	3,0	-	-	-	4,7	-	-	-	8,5	-	

Таблица П.1.2

Номинальные интенсивности отказов конденсаторов при $T^{\circ}=+20^{\circ}\text{C}$ и $K_n=1$

Тип конденсатора	Интенсивность отказов $\lambda_0, 10^{-6}/1/ч$
бумажные	1,8
металлобумажные	2,0
слодяные	1,2
стеклянные	1,6
керамические	1,4
пленочные	2,0
электрические алюминиевые	2,4
электрические танталовые	2,2

Таблица П.1.3

Номинальные интенсивности отказов полупроводниковых приборов при $T^{\circ}=+20^{\circ}\text{C}$ и $K_n=1$

	Полупроводниковые приборы	Интенсивность отказов $\lambda_0, 10^{-6}/1/ч$ приборов		
		германиевых	кремниевых	
Диоды	Выпрямительные точечные	0,7	2	
	Выпрямительные микроплоскостные	-	0,7	
	Выпрямительные плоскостные	-	5	
	Выпрямительные плоскостные повышенной надежности	-	2,5	
	Выпрямительные повышенной мощности	-	5	
	Импульсные точечные	3	-	
	Импульсные плоскостные мезадиодны	2	2,5	
	Импульсные сплавные	-	0,6	
	Управляемые	-	5	
	Стабилитроны	-	5	
	Варикапы	-	5	
	Выпрямительные столбы	-	5	
	Микромодульные	4,2	4,5	
	Транзисторы	Маломощные низкочастотные	3	4
		Мощные низкочастотные	4,6	-
Маломощные высокочастотные		2,6	-	
Мощные высокочастотные		5	1,7	
Микромодульные		1	-	

Т а б л и ц а П.1.4

Номинальная интенсивность отказов трансформаторов и моточных изделий (дроссели, катушки индуктивности и др.) при $T^{\circ}=+20^{\circ}\text{C}$ и $K_n=1$

Трансформаторы и моточные изделия	Интенсивность отказов $\lambda_0, 10^{-6}$ 1/ч
Автотрансформаторы	5,0
Силовые	3,0
Высоковольтные	4,0
Накальные анодные	2,0
Импульсные	0,5
Дроссели	1,0
Катушки индуктивности	0,5

Т а б л и ц а П.1.5

Номинальные интенсивности отказов некоторых микроэлектронных элементов при $T^{\circ}=+20^{\circ}\text{C}$ и $K_n=1$

Элемент	Интенсивность отказов $\lambda_0, 1/\text{ч}$
Интегральная схема	$0,2 \cdot 10^{-7}$
Резистор	$0,1 \cdot 10^{-7}$
Конденсатор керамический	$0,3 \cdot 10^{-7}$
Паяные соединения ножек элементов на печатной плате	$0,5 \cdot 10^{-7}$
Контакт разъема	$0,2 \cdot 10^{-7}$
Печатная плата /на один слой/	10^{-7}
Соединение накруткой	10^{-10}